



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica de
Fluidos

Diseño de un emisor submarino-caleta Ñuro

MONOGRAFÍA TÉCNICA

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Antonio Darwin MORALES BOGARÍN

ASESOR

Reuter Arturo ALIAGA DÍAZ

Lima, Perú

2008



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Morales, A. (2008). *Diseño de un emisor submarino-caleta Ñuro*. Monografía Técnica para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

DEDICATORIA

El presente trabajo esta dedicado a todas aquellas personas que contribuyeron conmigo a obtener una formación integral a los largo de mi vida:

Mis padres; por su apoyo constante, incondicional y sacrificado, mi agradecimiento más sincero y mi amor total.

Mis compañeros; por enseñarme a luchar y ver mas profundo, por luchar juntos y compartir ideales, mis más sinceros respetos y admiración.

Al pueblo, por mostrarnos el camino y enseñarme a seguirlo, toda mi vida entregaré para construir tu inevitable victoria.

Lima, 18 de setiembre del 2008

ADMB.

INDICE DE CONTENIDO

	PAG.
I. Resumen de la Monografía.	7.0
II. Introducción.	10.0
III. Objetivos. Objetivos generales. Objetivos específicos.	11.0
IV. Fundamento Teórico. 4.1 Tubería lisa HDPE. 4.2 Líneas submarinas.	12.0
V. Validación del Diseño del Emisor “Caleta Ñuro” 5.1 Datos iniciales del diseño original. 5.2 Cálculos Hidráulicos. 5.2.1 Elección del tipo de tubería – Tipo de material. 5.2.2 Cálculo de la presión en la tubería. 5.2.3 Cálculo del diámetro de la tubería. 5.2.4 Elección del tipo de tubería – Diámetro comercial. 5.2.5 Cálculo de las pérdidas de carga mayores. 5.2.6 Cálculo de las pérdidas de carga mayores. 5.2.7 Cálculo de las pérdidas de carga por densidad. 5.2.8 Cálculo de las pérdidas de carga total. 5.2.9 Cálculo de la capacidad de autolimpieza de la tubería. 5.3 Cálculos de las características mecánicas de la tubería. 5.3.1 Cálculo del espesor requerido de la tubería. 5.3.2 Cálculo de los esfuerzos en la dirección longitudinal. 5.3.3 Cálculo del radio de curvatura optimo de la tubería. 5.3.4 Pandeo de la tubería de pandeo durante la flexión 5.4 Cálculos de las características de los lastres de concreto. 5.4.1 Cálculo del espaciamiento entre lastres de concreto. 5.4.2 Cálculo del peso de los lastres de concreto. 5.4.3 Tipos de Lastres de concreto.	24.0

5.4.4 Cálculo de la resistencia al arrastre de la línea.

5.4.5 Cálculo de líneas auxiliares.

5.4.6 Predimensionamiento del lastre de concreto.

VI. Conclusiones	58.0
6.1 Conclusiones generales.	
6.2 Conclusiones específicas.	
VII. Recomendaciones.	60.0
VIII. Bibliografía.	61.0
IX. Anexos.	62.0
X. Fotografías	66.0

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

INDICE DE TABLAS:

- 4.1 Designación del material.
- 4.2 Relación entre MRS y σ_s coeficiente de diseño C a 20°C.
- 4.3 Ficha Técnica PE-80 y PE-100.
- 4.4 Coeficiente de permeabilidad específico del HDPE a 20°C y 50 micrones de espesor.
- 5.1 Relación de flexión permisible durante el hundimiento
- 5.2 Coeficiente de fricción para distintos tipos de lastres
- A.1 Principales propiedades mecánicas del HDPE (T=20°C).
- A.2 Resistencia del HDPE a los agente químicos.
- A.3 Dimensiones para tuberías PE-80, Norma ISO 4427 (Tensión admisible 63 Kg/cm²).
- A.4 Dimensiones para tuberías PE-100, Norma ISO 4427 (Tensión admisible 80 Kg/cm²).

INDICE DE FIGURAS:

- 4.1 Curva de regresión PE-80.
- 4.2 Curva de regresión PE-100.
- 4.3 Fenómeno de Serpenteo de una línea de HDPE expuesta y soportada.
- 4.4 Abaco para la Fórmula de Hazen y William PE-100 – ISO 4427 para PN-10 y PN-16
- 4.5 Comparación de la resistencia a la abrasión de diversos materiales.
- 4.6 Rollos de 100 metros de Tubería lisa HDPE PE-80 Dext. 110mm PN-10
- 4.7 Tubería lisa HDPE Dext. 160mm instalada a la intemperie, dos años después de ser instalada.
- 4.8 Línea de admisión de agua en el río Glomma (Noruega).
- 4.9 Línea de transmisión de aguas de desagüe a través del río Glomma (Noruega).
- 4.10 Línea de emisario industrial al norte de Noruega
- 5.1 Vista de Perfil del Emisor Submarino.
- 5.2 Unión tipo Espiga Campana.
- 5.3 Unión tipo Flexible.
- 5.4 Soldadura por termofusión.
- 5.5 Perfil de la Tubería HDPE – Parte expuesta.
- 5.6 Presión interna del fluido dentro de una Tubería
- 5.7 Tubería de PE bajo flexión pura.
- 5.8 Análisis de cuerpo libre de la Línea en el Fondo Marino.
- 5.9a Coeficiente de arrastre, C_D Vs. Re.

- 5.9b Coeficiente de arrastre, C_L Vs. Re .
- 5.10 Análisis de cuerpo libre de la línea en flotación.
- 5.11 Tipos de lastres de concreto.
- 5.12 Análisis de cuerpo libre de la Línea en Flotación con líneas auxiliares.
- 5.13 Lastre de sección trapezoidal.
- 5.14 Lastre de sección trapezoidal volteada durante el lanzamiento.
- 5.15 Lastre de sección rectangular volteada durante el lanzamiento.
- 5.16 Principales características del lastre de concreto.

I. RESUMEN DE LA MONOGRAFÍA:

El diseño de un emisor submarino o de cualquier línea de conducción de fluido líquido en general, debe comenzar en el análisis hidráulico, para pasar posteriormente a la ingeniería de detalle. Con la finalidad de darle un mejor sentido a las ecuaciones obtenidas, utilizamos el diseño original del “Emisor Submarino de la Caleta Ñuro”.

Iniciamos este trabajo con una comparación entre las dos tuberías plásticas más utilizadas en nuestro país para conducción de fluido: PVC (Policloruro de Vinilo) y HDPE (Polietileno de Alta Densidad), llegando a la conclusión que para este tipo de proyectos la tubería de HDPE es la mejor opción debido a sus mejores propiedades mecánicas y su alta resistencia química y a la intemperie.

Determinado el tipo de tubería a utilizar, el segundo paso será calcular la clase de la tubería¹, para ello calculamos la presión estática que el fluido ejerce sobre el punto más bajo de la línea. Después de realizar unos cálculos sencillos llegamos a la conclusión que para este tipo de proyectos donde la diferencia de cotas es muy pequeña (normalmente menores a 30 metros) podemos utilizar cualquier “clase” comercial de tuberías ya que estas se fabrican a partir de 4 bares de presión².

Realizando un análisis hidrostático determinamos que la presión máxima que el fluido conducido ejerce sobre las paredes de la tubería es aproximadamente igual a la altura del punto de ingreso a la línea H_O (salida del tanque de almacenamiento) respecto al nivel del mar. Es así que se toma como **criterio principal** para el funcionamiento del sistema que la pérdida de carga dentro de la tubería debería ser muy inferior a la altura del punto de ingreso: $H_T << H_O$. Bajo este criterio se toma un valor H_T' y se calcula un valor aproximado del diámetro interno de la tubería. Finalizamos esta selección utilizando una tubería cuyo diámetro interior sea igual o superior al encontrado. Para comprobar que nuestra elección es correcta, se recalculan las pérdidas de carga reales dentro de la línea (H_T) las que deberán ser menores a las supuestas inicialmente (H_T').

El paso siguiente es calcular los principales esfuerzos a los que la línea estará sometida durante su funcionamiento: El esfuerzo longitudinal producto de la presión interna que el fluido ejerce sobre las paredes la tubería y el esfuerzo circunferencial producto fuerzas de flexión durante la maniobras de lanzamiento y hundimiento o durante su funcionamiento. El primero es mínimo debido a la poca presión de fluido que este tipo de sistemas transporta, mientras que el segundo es determinante para el diseño del sistema. Un radio de curvatura óptimo es el adecuado para garantizar que el esfuerzo circunferencial es suficientemente pequeño para no producir problemas en el funcionamiento de la tubería, siendo este de 60 veces el diámetro exterior de la tubería. Por otra parte, conocer la relación de flexión permisible ($a_{\text{permisible}} = 17$ para nuestro caso) nos brinda el valor mínimo permisible que debe tener el radio de curvatura durante las maniobras de lanzamiento y hundimiento. Un inadecuado manipuleo de la tubería durante el lanzamiento, que genere un radio de curvatura inferior al mínimo permisible podría provocar la formación de grietas, pandeo y hasta la ruptura de la tubería. De igual manera sucedería si este

¹ Se denomina clase de la tubería a su capacidad de resistir presión interna. Por ejemplo: Una tubería clase 5 soporta una presión interna de fluido de 5 kg/cm².

² Cada bar equivale a 10 metros de columna de agua, por lo cual una tubería de 4 bares de presión soporta 40 metros de columna de agua.

inconveniente se presenta durante el funcionamiento del sistema por desniveles en el fondo marino u otras causas.

Calculadas las principales características de funcionamiento de la tubería, debemos hacer lo propio con los elementos que servirán de lastre. Los lastres de concreto (también llamados muertos de concreto) son necesarios para fijar la línea en un trazado previamente determinado. Dicha fijación es importante debido a que existen fuerzas que provocarán que la línea flote³, tal como el empuje, la sustentación de la corriente y el oleaje; y fuerzas que intentarán desplazarla a lo largo del fondo marino que son principalmente provocadas por la fuerza de arrastre de la corriente y el oleaje. Vamos a realizar un análisis “aproximado” de estas componentes para hacer sencillo el diseño, sin embargo se presentarán ocasiones en que se requieran análisis más exhaustivos.

El criterio para calcular el peso del lastre de concreto es sencillo: *“El lastre de concreto debe ser suficientemente liviano para permitir la flotación de la línea al momento del lanzamiento y suficientemente pesado para mantener la línea estable en el fondo marino”*. Bajo este criterio es sencillo concluir que el peso óptimo del lastre se encuentra comprendido entre dos valores que cumplen las dos premisas antes mencionadas. Para nuestro ejemplo práctico concluimos que el peso del lastre de concreto esta comprendido entre 114N y 191N (11.6 Kgf y 19.5 Kgf), siendo el peso elegido 180N (18.4 Kgf).

Con los cálculos anteriores garantizamos que la línea se mantendrá estable en el fondo marino en cuanto a su componente vertical se refiere; teniendo que analizarse su estabilidad en la componente horizontal. El desplazamiento horizontal de la línea en el fondo marino se deberá principalmente a la acción de la fuerza de arrastre (F_D) que la corriente marina ejerce sobre la tubería durante su funcionamiento. La fuerza que se debe oponerse al arrastre es la fuerza de fricción que el lastre de concreto ejerce sobre el fondo marino (F_f) siendo esta directamente proporcional a la normal y al coeficiente de fricción (μ). La fuerza de fricción es la resultante de la sumatoria de fuerzas verticales, mientras que el coeficiente de fricción depende del tipo de lastre nosotros elijamos. Para nuestro proyecto elegimos un lastre de sección rectangular que tiene un coeficiente de fricción de 0.5.

Realizando los cálculos de estabilidad correspondientes obtenemos que el peso del lastre de concreto no será suficiente para mantener la estabilidad de la línea contra el arrastre, teniendo un coeficiente de seguridad de 0.33. Para solucionar este inconveniente es necesario que el lastre de concreto tenga un mayor peso, y para calcular su valor, se utilizando los pasos antes mencionados pero en orden inverso. Finalmente obtenemos que para mantener la estabilidad de la línea en el fondo marino, el peso del lastre de concreto debe ser de 319N (32.6 Kgf).

Sin embargo, dado que el peso del lastre es mayor a lo permitido en el análisis de flotación, es necesario considerar líneas auxiliares de flotación que proporcionen un empuje superior al sobrepeso del nuevo lastre. Se realiza un nuevo análisis de cuerpo libre de la línea de flotación y obtenemos el nuevo empuje requerido para mantener la línea en flotación. Con esta información estamos en condiciones de determinar la cantidad y dimensiones de las líneas auxiliares de flotación. Para nuestro proyecto se contempla la utilización de *dos líneas auxiliares de flotación de tuberías lisas HDPE PE-80 Dext. 90mm PN-10*. Es muy importante indicar que las líneas de flotación solo serán utilizadas durante las maniobras de lanzamiento, siendo retiradas durante el hundimiento de la línea.

³ Cabe resaltar que debido a su densidad el HDPE siempre tiende a flotar en el agua.

Una vez finalizado los cálculos teóricos de diseño, podemos pasar al predimensionamiento de los lastres, tomando en consideración criterios constructivos prácticos, que faciliten la fabricación de los lastres en un corto tiempo y con características adecuadas. Un criterio muy importante es el uso de materiales que sean resistentes a los efectos del agua salada (oxidación en el caso de los metales y disgregación en el caso del concreto).

En la presente monografía no se tocará el diseño ni la descripción de los trabajos concernientes a la instalación de la línea (maniobras de lanzamiento y hundimiento) debido a lo extenso del tema, sin embargo es importante resaltar que esta segunda parte es tan o más importante que la desarrollada en esta monografía, siendo actualmente en nuestro país muy pocas empresas capaces de desarrollar este trabajo.

En la parte final del trabajo (anexos) se puede encontrar información adicional correspondiente a las características del material que estoy seguro será de mucha utilidad para aquel que desee trabajar con tuberías de HDPE.

II. INTRODUCCIÓN:

Las tuberías de polietileno submarinas se utilizan en el mundo para transporte de agua potable y aguas residuales desde 1960 (en el Perú data de finales de siglo).

Por aquel entonces, los tubos se fabricaban con una longitud de 12 m, se soldaban mediante fusión a tope, se lastraban con lastres de hormigón y se sumergían hasta el fondo del mar introduciendo agua por un extremo y liberando aire por el otro extremo.

El método es casi idéntico hoy en día. No obstante, se da más importancia al diseño y a los cálculos para garantizar una instalación segura y así evitar daños.

Otra innovación es el uso de tubos de gran longitud (hasta 500 m) con extrusión continua realizada en la fábrica, remolcados en barco hasta el emplazamiento y unidos mediante conexiones embridadas. Este tipo de metodología de instalación aún no ha sido practicada en nuestro país debido a que la industria del polietileno está aún en desarrollo.

Desde 1960 también se han conseguido mejoras significativas en el desarrollo de materias primas y métodos de producción.

En consecuencia, las tuberías de polietileno son actualmente el material más comúnmente utilizado en instalaciones submarinas a nivel mundial. La combinación de flexibilidad y resistencia las hace superiores a otros materiales.

Esta solución es aplicada con mucho éxito en diferentes países. En Perú, por ejemplo, existen un gran número de líneas submarinas instaladas con tuberías de HDPE: líneas de succión de pescado, líneas de conducción de petróleo, emisores, entre otros; siendo la industria pesquera la pionera y principal promotora de estos proyectos. Los diámetros varían en un intervalo de Ø 110 mm - Ø 630 mm.

Para el presente trabajo, a manera de ejemplo práctico tomaremos los datos reales que sirvieron para diseñar el “Emisor Submarino de la Caleta Ñuro”, proyecto elaborado y ejecutado bajo la supervisión de FONDEPES, ubicada en la Caleta Ñuro, distrito de los Órganos, provincia de TalaRa, departamento de Piura. Este proyecto tuvo muchos errores en el diseño debido principalmente a la falta de conocimiento sobre el tema y la escasa experiencia del diseñador. Estos errores trajeron problemas muy serios en la etapa de la ejecución, los cuales fueron corregidos a tiempo utilizando la ingeniería para ello.

La Caleta Ñuro fue inaugurada a finales de octubre el año pasado y es la única administrada por FONDEPES que posee un emisor submarino, actualmente totalmente en funcionamiento.

III. OBJETIVOS:

2.1. OBJETIVOS GENERALES

1. Diseñar un emisor submarino de aguas residuales con tuberías HDPE en la Caleta Ñuro, distrito de Los Órganos, Provincia de Talara, Departamento de Piura, Región

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Describir las principales características de las tuberías HDPE y las principales ventajas que tiene frente a la tubería e PVC en aplicaciones de emisarios submarinos.
2. Describir metódicamente los pasos a seguir para el diseño de un emisor submarino, tomando como referencia los parámetros del “Emisor Submarino de la Caleta Ñuro”.
3. Plantear las ecuaciones básicas generales que sirven para realizar el diseño de un emisor submarino.
4. Plantear y sustentar algunos criterios prácticos finales complementarios al diseño.

IV. FUNDAMENTO TEORICO:

4.1 TUBERÍA DE LISA DE HDPE

4.1.1 MATERIA PRIMA

El polietileno (PE) es un termoplástico obtenido de la polimerización del monómero del etileno en cadena de alto peso molecular ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$), este último es un derivado del petróleo.

La designación del material (por ejemplo PE-80), según la norma ISO 12162⁴, tiene relación directa con el tipo de resina de acuerdo al nivel aplicable de resistencia mínima requerida (MRS). Ésta debe ser considerada en el diseño de tuberías de HDPE en servicio a largo plazo, mínimo 50 años y a 20°C. Esta designación se especifica en la Tabla 4.1.

La tensión de diseño de la tubería, de acuerdo con la norma ISO 12162, se obtiene al aplicar un coeficiente de diseño C sobre el valor MRS del material:

$$\sigma_s = \frac{MRS}{C} \dots\dots\dots(4.1)$$

Los valores de coeficientes global de diseño se especifican en la norma ISO 12162, "Table 2 – Minimum values of C", donde $C=1.25$ para todos los tipos de HDPE.

Nota: El calculista puede aplicar un coeficiente de diseño mayor, dependiendo de las condiciones de operación y las condiciones ambientales, de acuerdo con la norma ISO 12162. Asimismo, el calculista deberá considerar un factor de diseño, de acuerdo a la norma DIN 8074 (tabla 6), cuando el fluido puede representar un riesgo especial si es manipulado incorrectamente.

Tabla 4.1. Designación del material

Designación de material	MRS (1) Mpa	Tensión de Diseño Mpa
PE 100	10	8
PE 80	8	6.3
PE 63	6.3	5
(1) MRS a 50 años y 20°C		

La Tabla 4.1 se basa en la norma ISO 4427, "Table 1 – Designation of material"

⁴ Clasificación de materiales termoplásticos en forma de tubos, basados en la resistencia a presión hidrostática interna. Designación de material y calculos.

Tabla 4.2. Relación entre MRS y σ_s coeficiente de diseño C a 20°C

Tensión de Diseño Mpa	MRS Mpa		
	10	8	6.3
	Coeficiente de diseño C		
8	1.25		
6.3	1.6	1.25	
5	2	1.6	1.25

La Tabla 4.2 se base en la Norma ISO 4427, "Table 2 – relationship between MRS and design coefficient C at 20°C"

4.1.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

La materia prima tiene un 2% de humo dispersado en la masa, y antioxidantes que le dan una gran resistencia a los rayos ultravioletas. El alto peso molecular y una distribución molecular estrecha, le dan propiedades físicas muy estables difíciles de lograr con otros materiales termoplásticos.

Las especificaciones técnicas que deben cumplir las tuberías de HDPE están establecidas en normas internacionales y en la norma técnica peruana NTP ISO 4427:2000.

A continuación, en la Tabla 4.3, se presenta una descripción general con las especificaciones técnicas correspondientes a los grados de HDPE de uso más común:

Tabla 4.3. Ficha Técnica PE-80 y PE-100⁵

Propiedad	Unidad	Valor PE-80	Valor PE-100	Norma
Densidad (resina base)	g/cm ³	0.945	0.949	ISO 1183
Densidad (Compuesto)	g/cm ³	0.953	0.955	ISO 1183
Índice de fluidez MFI (190°C/5Kg)	g/10 min	Max. 0.55	Max. 0.40	ISO 1133
Contenido de negro de humo	%	≥2	≥2	ASMT D 1603
Propiedades Mecánicas				
Tensión máxima elástica	N/mm ²	21	25	ISO 6259
Elongación límite rango elástico	%	9	9	ISO 6259
Resistencia a la rotura	N/mm ²	33	35	ISO 6259
Elongación de rotura	%	>600	>600	ISO 6259
Módulo de elasticidad	N/mm ²	1000	1400	ISO 527
Dureza	Shore D	59	60	ISO 868
Clasificación MRS	MPa	MRS 8	MRS 10	ISO 12162
Propiedades Térmicas				
Tiempo de inducción a la oxidación a 200°C	Min.	>20	>20	ISO TR 10837
Coeficiente medio de dilatación lineal entre 20 y 90°C	m/m°C	2 x 10 ⁻⁴	2 x 10 ⁻⁴	ASTM D 396
Conductividad térmica a 20°C	w/m K	0.4	0.4	DIN 52612

⁵ Estos valores son solamente referenciales, variando ligeramente entre fabricantes.

4.1.3 CARÁCTERÍSTICAS

Propiedades químicas del material

Fórmula molecular – $(CH_2 - CH_2) - n$

Las tuberías HDPE poseen excelentes propiedades químicas, insoluble en todos los solventes orgánicos e inorgánicos. Sólo es atacado a la temperatura ambiente y en el transcurso del tiempo por oxidantes muy fuertes (H_2SO_4 concentrado, HNO_3 concentrado y agua regia).

Los halógenos en estado libre (cloro, bromo, etc.), a temperatura ambiente forman polietileno halogenado con desprendimiento de haluro de hidrógeno. La estructura del material no queda destruida, pero cambian las propiedades físicas y químicas.

Elementos que no deben ser transportados en tuberías HDPE son: Tetracloruro de carbono, Bisulfito de carbono, Cloroformo, Flúor, Ozono, Trióxido de sulfuro, Cloruro de thionil, Tolueno, Xileno, Tricloroetileno.

La permeabilidad de los gases es muy baja; para una pared de 50 micrones de grosor, el coeficiente de permeabilidad específico a 20°C es:

Tabla 4.4. Coeficiente de permeabilidad específico del HDPE a 20°C y 50 micrones de espesor

Gases	$(cm^3 / cm * s mbar) * 10^{12}$
Aire	2.4
Gas Natural	5.6
O ₂	7.0
H ₂	21.0
SO ₂	50.0
CO ₂	18.0
N ₂	2.0
CH ₂	6.0
S = Espesor de pared	

Al quemarse las tuberías HDPE desprenden CO, CO₂, H₂O, pero ningún gas nocivo.

Servicio a largo plazo:

En las tuberías de plástico sometidas a presión hidrostática interna, su solidez depende de la temperatura y del tiempo. Las curvas descritas en las figuras 4.1 y 4.2 son el resultado de numerosos ensayos y se confirma con el método de extrapolación de Arrhenius, para temperaturas bajas y tiempos prolongados.

A través de las curvas de regresión se puede obtener la siguiente información:

- Vida útil del polietileno.
- Tensión de diseño.
- El tiempo en que ocurre la rotura dúctil y la rotura frágil.

Las gráficas presentadas a continuación son sólo a modo de ejemplo, debido a que cada proveedor de resina cuenta con sus propias curvas de regresión; la cuales son realizadas en laboratorios externos.

De acuerdo a estas figuras, todos los proveedores de resina señalan que la vida útil del Polietileno de alta densidad (HDPE) se extiende hasta los 100 años; en donde es posible determinar la tensión de diseño de cada resina, además de los tiempos de falla del material a distintas temperaturas. Se consideró un coeficiente de seguridad de 1.25 dado por la norma ISO 12162.

Figura 4.1: Curva de regresión PE-80

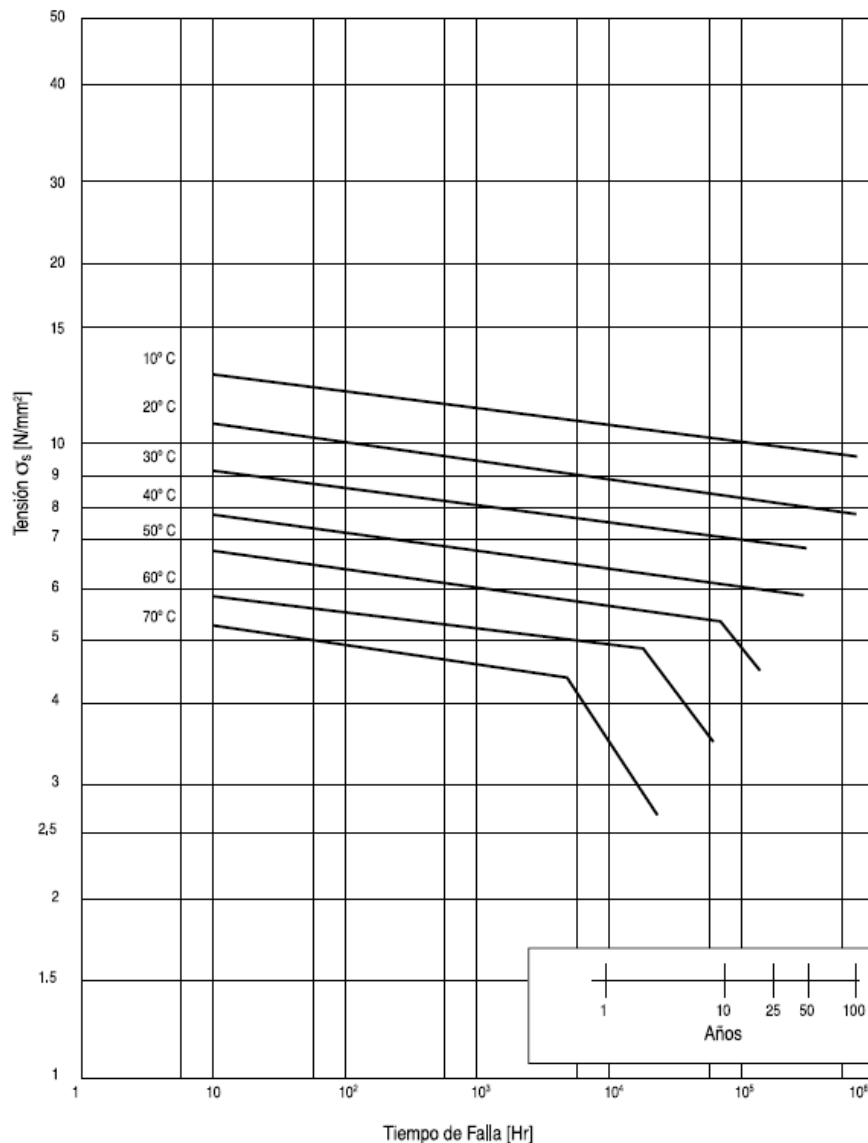
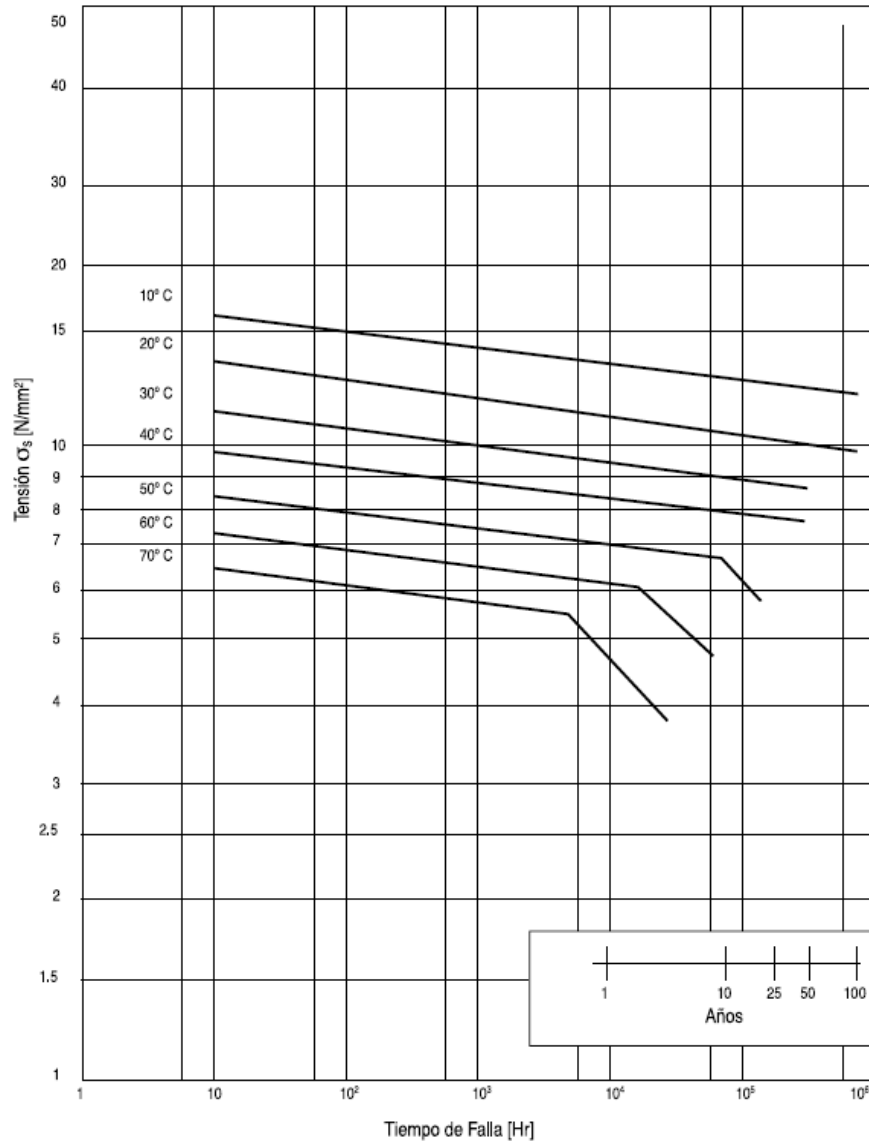


Figura 4.2: Curva de regresión PE-100



En la Ordenada de los gráficos se ha representado las tensiones comparativas de σ_s , que esta relacionada con las dimensiones y la presión de la tubería según la fórmula⁶:

$$\sigma_s = PN * \frac{(D - e)}{2 * e} \dots\dots\dots(4.2)$$

Donde:

PN: Presión nominal (Kg/cm²).

D: Diámetro exterior del tubo (mm).

⁶ Utilizando la ecuación 4.2 se calcular el espesor de la tubería, para cada Presión de Nominal de Trabajo de la tubería (PN). Se debe considerar que la Tensión del Material es un valor constante dependiendo del tipo de resina de HDPE a utilizar.

e: Espesor mínimo de pared del tubo (mm).

σ_s : Tensión del material (Kg/cm^2)

La determinación de los valores mínimos de la resistencia (MRS) están fijados por la norma ISO 12162.

Influencia temperatura

El agua transportada por las tuberías de plástico experimenta pequeña variaciones de temperatura, debido al bajo coeficiente de conductividad térmica que tienen estos materiales, sobre todo comparado con el de materiales tradicionales. Esto hace que cuando la temperatura ambiente baja de los 0°C , el agua conducida por una tubería de plástico se hiele con mayor dificultad que la conducida por una tubería de otro material. Además, hay que tener en cuenta, que aprovechando el bajo módulo de elasticidad de los plásticos, el tubo podrá absorber con mayor facilidad el incremento de volumen que experimenta el agua en el caso de congelarse.

En cuanto a las variaciones dimensionales que pueden experimentar estos tubos, motivados por cambios de temperatura, estas pueden ser reversibles originadas por la dilatación térmica, e irreversibles debidas a la descongelación de tensiones internas introducidas en los tubos durante el proceso de extrusión. En lo que se refiere a las variaciones dimensionales reversibles, hay que considerar el alto coeficiente de dilatación lineal que presenta el HDPE en comparación con otros materiales como el acero o la fundición dúctil, y valorar esta característica a la hora de proyectar una instalación, y respecto a las irreversibles reducir estas cuidando el proceso de transformación de los tubos y vigilándolas, realizando el ensayo normalizado de comportamiento al calor.

La temperatura, asimismo, tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas de los tubos, y así, por ejemplo, hay que tener en cuenta que al descender la temperatura, aumenta la fragilidad del HDPE (temperaturas menores a -40°C) o lo que es lo mismo, disminuye su resistencia al impacto. Por otro lado, al aumentar la temperatura, se reduce la resistencia a la tracción, lo que significa que disminuye la resistencia a la presión interna, y por eso al definir la presión nominal de un tubo fabricado a base de un material termoplástico, esta se refiera a una temperatura de 20°C .

El coeficiente de seguridad debe tener en cuenta, además, todos los esfuerzos adicionales incontrolables que pueden producirse durante el servicio, como golpes de presión y tensiones térmicas en cambios de temperatura, así como movimientos y hundimientos de tierra en tuberías ya tendidas.

Consideraciones sobre la expansión térmica de las tuberías HDPE

El coeficiente de expansión térmica es de $2 \times 10^{-4} \text{ m/m}^\circ\text{C}$.

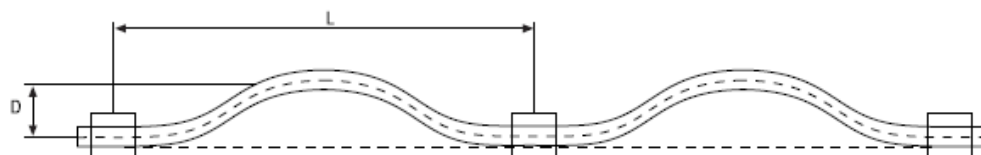
Expansión y contracción de tuberías HDPE en superficies

Cuando las tuberías no pueden ser protegidas contra la acción directa de los rayos solares, conviene pintarlas de blanco para disminuir la absorción de calor.

Colocando la tubería HDPE como en la figura se transfiere la dilatación lineal a deflexión lateral según la fórmula:

$$D = 0.0078 * L * \Delta T^{0.5} \dots\dots\dots(4.3)$$

Figura 4.3: Fenómeno de Serpenteo de una línea de HDPE expuesta y soportada



Características hidráulicas

Las características de la superficie de las tuberías de HDPE y su resistencia a la corrosión, incrustaciones y sedimentación, significa que éstas tienen mucha menor pérdida de carga que las tuberías tradicionales.

Las tuberías HDPE poseen un factor de rugosidad absoluta igual a 0.025mm, pudiendo utilizarse comúnmente un factor “C” de 150 para la fórmula de Hazen-Williams. El coeficiente de Manning “n” es de 0.009⁷ para agua limpia a temperatura ambiente. En tuberías tradicionales se hacen correcciones al valor “n” debido a sedimentaciones y embanques; la naturaleza abrasiva y no polar del polietileno minimiza este efecto.

Para el cálculo de caudal en una tubería de sección llena y a presión, se utiliza la fórmula de Hazen-William, que tiene la siguiente expresión:

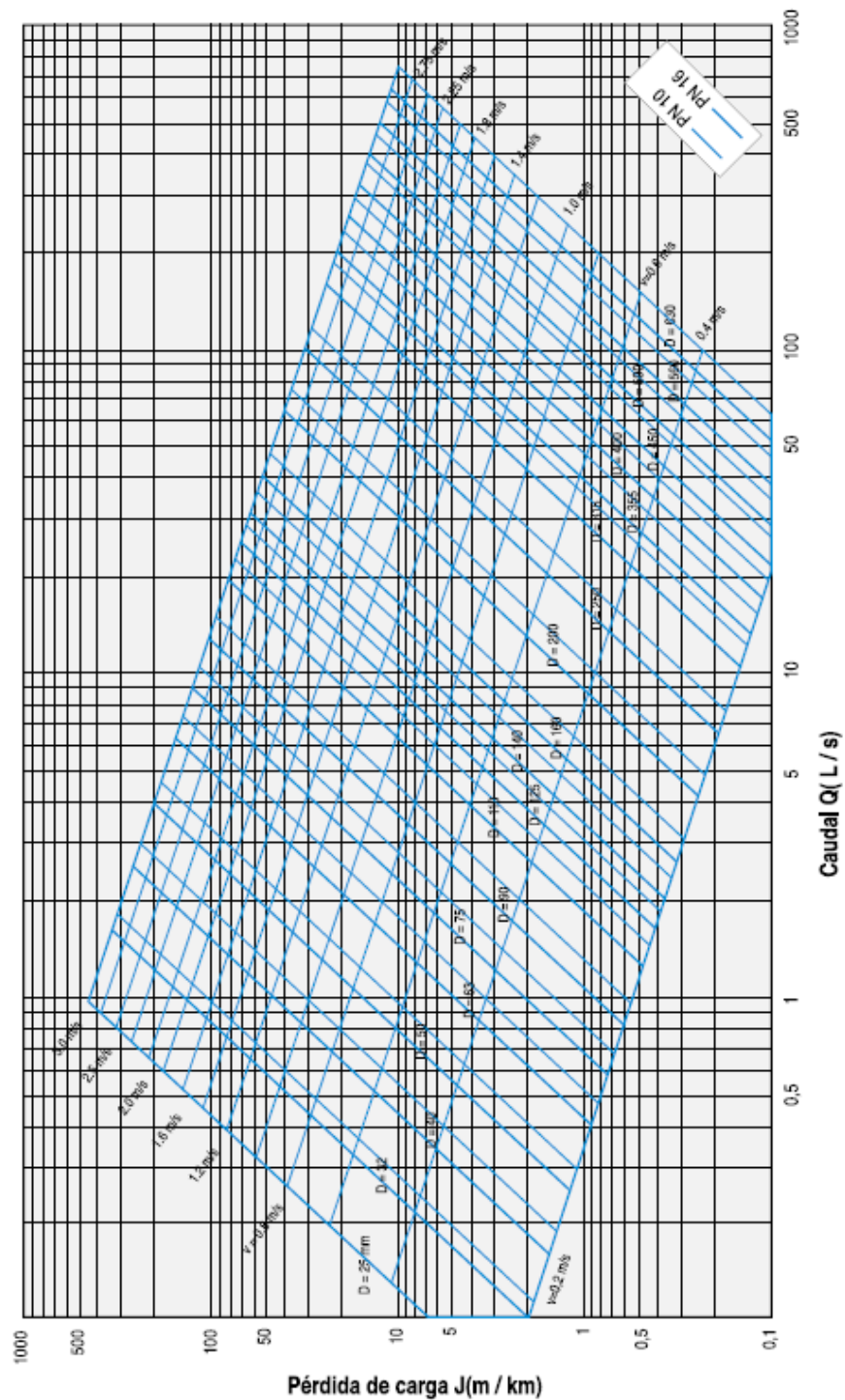
$$Q = 0.2785 * C * D^{2.63} * J^{0.54} \dots\dots\dots(4.4)$$

Donde:

- Q: Caudal (m³/s)
- D: Diámetro interior de la tubería (m)
- J: Pérdida de carga unitaria (m/m)
- C: Coeficiente de Hazen-Williams = 150

⁷ Para conducción de fluidos sin presión normalmente se utilizan las tuberías corrugadas de HDPE con pared interior lisa, las cuales tienen un coeficiente de Manning “n” de 0.012, debido a las ondulaciones que forman la pared interior con la exterior.

**Figura 4.4: Abaco para la fórmula de Hazen y William
PE-100 – ISO 4427 para PN-10 y PN-16**



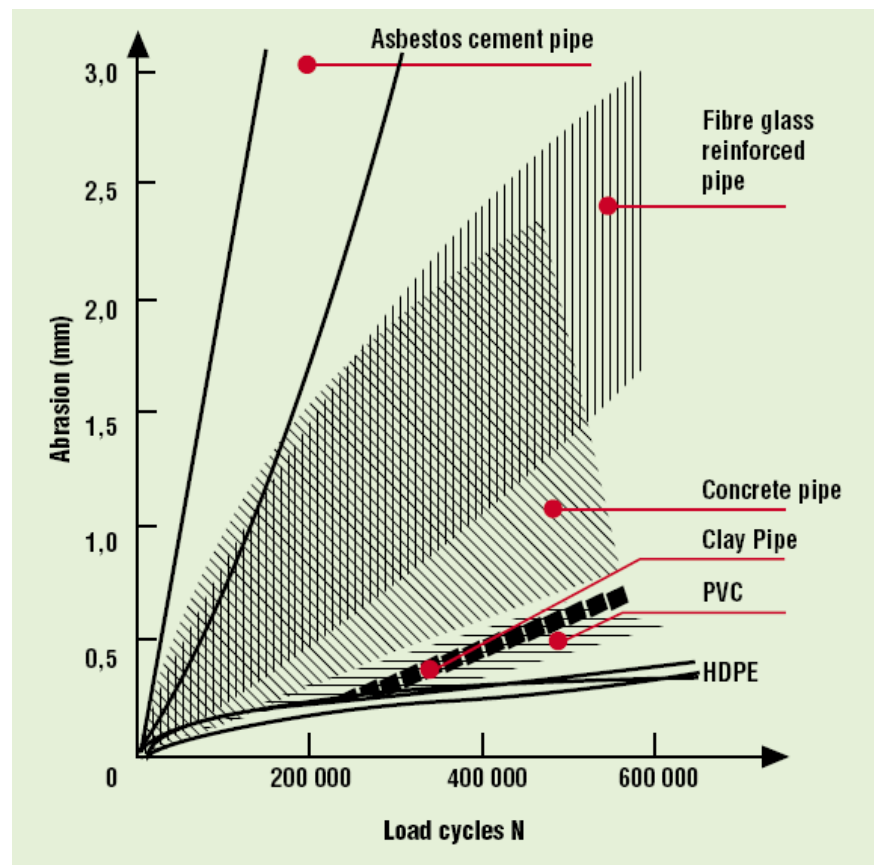
Resistencia a la abrasión:

La investigación ha demostrado que las partículas sólidas transportadas en agua tienen la capacidad de erosionar los tubos con una velocidad de erosión que aumenta con el incremento de la velocidad del flujo, de la concentración de los sólidos, de la temperatura y de las dimensiones de las partículas. Mientras que en condiciones normales de uso los

tubos de cemento han logrado resultados aceptables en el campo industrial, los tubos de plástico han sustituido ventajosamente a los tubos de acero que estaban expuestos a una fuerte erosión; pruebas comparativas han demostrado que existen una marcada diferencia de erosión.

A pesar que los tubos plásticos para alcantarillado no han superado la meta de los 50 años de la vida operativa, no se nota desgaste debido a la abrasión. En las tuberías que están en servicio del 1966 no evidencian ninguna razón de que puedan presentar inconvenientes en los próximos decenios.

Figura 4.5: Comparación de la resistencia a la abrasión de diversos materiales⁸



Propiedades eléctricas:

El polietileno es un óptimo aislante por su estructura no polar, característica notable utilizada en diferentes aplicaciones. Desde el inicio de su producción a nivel industrial, estas características hacen que en los tubos se genere cargas electrostáticas; en los tubos enterrados el problema está resuelto por la humedad misma del terreno.

⁸ Figura obtenida de la información técnica de ARMTEC, la más importante empresa fabricante de tuberías corrugadas de HDPE de Canadá. El cuadro resume un ensayo realizado por ellos, donde comparan la resistencia a la abrasión de tuberías fabricadas de diversos materiales: Asbesto cemento (Asbestos cement), Fibra de vidrio reforzada (fibre glass retorced), concreto (concrete), arcilla (clay), PVC y HDPE; a ciclos de carga de fluido con sedimento.

Además, la elevada resistividad del volumen superficial hace que el material no sufra en lo mínimo por las corrientes parásitas.

Atoxicidad:

Ha sido probado el uso de tubos de polietileno (PE) en el transporte de agua potable por todas las normativas internacionales. Dicho material responde a todas las prescripciones higiénicas relacionadas a los acueductos como también a las normativas relacionadas a los materiales que vienen en contacto con alimentos; todo está favorecido por la completa ausencia de sabor y olor del material mismo.

Resistencia y flexibilidad:

La Tubería de HDPE es capaz de absorber impactos normales producidos por el manipuleo y la instalación. Adicionalmente tiene una gran flexibilidad pudiendo ser fabricadas en rollos de 100 metros para tuberías de 110mm (4") cuando estas tienen una presión nominal de 10 bares.

En la puesta en obra de los tubos de HDPE, es importante tener presente el radio de curvatura mínimo y así no crear tensiones en las paredes del tubo demasiado elevados, y en particular en los tubos con bajo espesor de pared.

Figura 4.6: Rollos de 100 metros de Tubería lisa HDPE PE-80 Dext. 110mm PN-10



Estabilidad a la intemperie:

Están protegidas contra la degradación que causan los rayos UV al ser expuestas a la luz directa del sol, ya que contienen un porcentaje de

negro de humo (la cantidad mínima que debe contener el polietileno es 2%), que además le otorgan un color negro característico.

Esto permite que las tuberías de HDPE puedan ser instaladas a la intemperie.

Figura 4.7: Tubería lisa HDPE Dext. 160mm instalada a la intemperie, dos años después de ser instalada



4.1.4 APLICACIONES

- Minería: Conducción de relaves altamente abrasivos, conducción de ácidos, etc.
- Industria Química
- Área Sanitaria: Sistemas de agua potable y alcantarillado, conducción de aguas servidas, etc.
- Agricultura. Sistemas de riego tecnificado.
- Industria en General: Transporte de gas, protección de cables eléctricos y telefónicos, etc.

4.2 LÍNEAS SUBMARINAS

Siguiendo la dirección de transporte natural del agua para consumo, podemos dividir la instalación en 3 categorías:

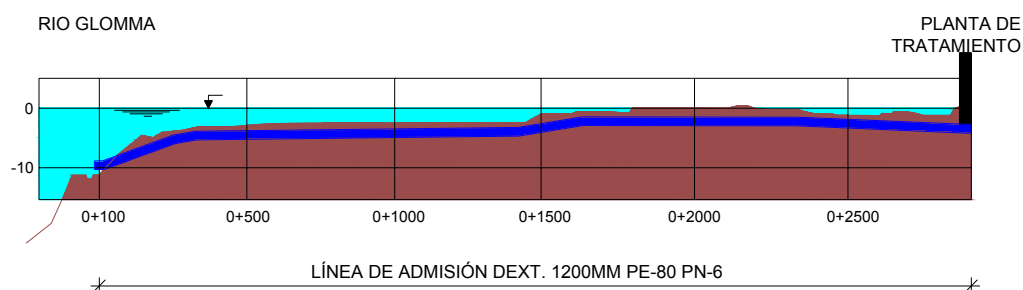
- Línea de admisión
- Línea de transporte
- Línea de salida o emisario

4.2.1 Línea de admisión

Las tuberías de admisión se utilizan en aplicaciones tanto civiles como industriales y sirven para captar agua de alguna fuente cercana, pudiendo ser ríos, lagos y fiordos.

La figura siguiente se muestra un ejemplo de tubería de admisión de agua de río. En la figura se aprecia una nueva toma de agua en el río Glomma (Noruega). La tubería tiene un diámetro de 1200 mm y una longitud de 3 km. El material de fabricación de los tubos es polietileno PE-80 SDR17.

Figura 4.8: Línea de admisión de agua en el río Glomma (Noruega)



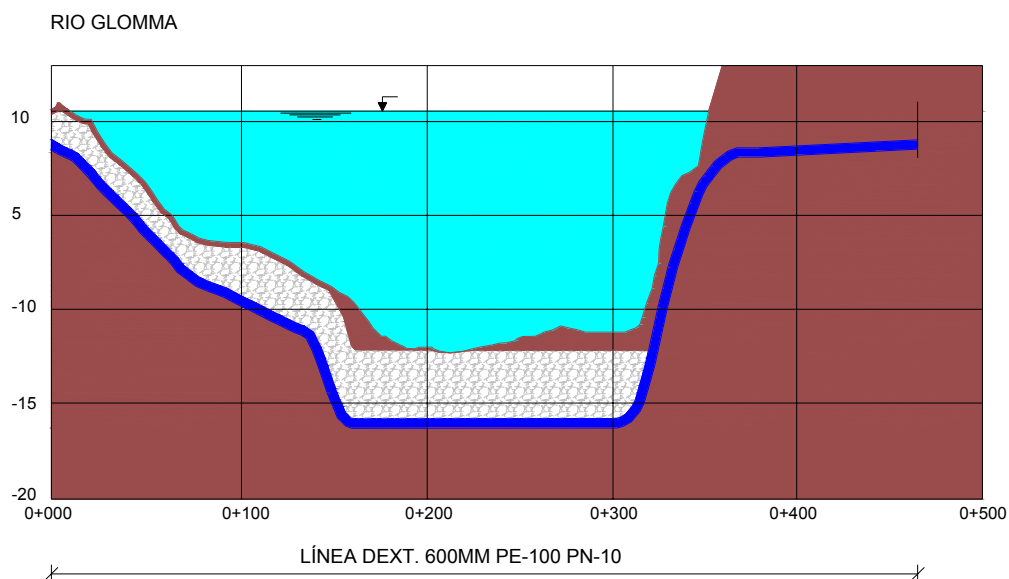
4.2.2 Línea de transporte

Este tipo de líneas se utilizan para transportar fluidos donde podría resultar más conveniente atravesar lagos y fiordos con tuberías submarinas en lugar de utilizar una ruta más larga junto a la orilla. En otras situaciones, es necesario cruzar los ríos y los mares para aprovisionar ciudades e islas de agua, o para eliminar las aguas residuales.

La figura siguiente se ilustra el cruce de un río. En la figura aparece el perfil de una tubería de polietileno, un cruce del sistema de alcantarillado del Glomma, el río más largo de Noruega. El diámetro de la tubería es de 600 mm y el grosor de pared de 55 mm. (PN10). La longitud lineal es 450 m. Se necesitó una zanja de cinco metros de profundidad en el fondo del río para evitar daños en la tubería causados por las anclas de las barcazas. Se eligieron tubos de polietileno por su flexibilidad, que posibilitó la fabricación de toda la longitud en una sola pieza en la fábrica; después la tubería se remolcó hasta el emplazamiento y finalmente se sumergió dentro de la zanja en el fondo del río.

Tras el hundimiento, la zanja se rellenó con grava.

Figura 4.9: Línea de transmisión de aguas de desagüe a través del río Glomma (Noruega)



4.2.3 Tubería de salida – Emisario

Este tipo de líneas se utilizan para conducir las aguas residuales tratadas hacia el área de descarga del medio receptor a una cierta profundidad y distancia de la costa. Una salida de agua profunda facilitará una dilución excelente de las aguas de desecho.

La profundidad de salida variará en un intervalo de 10-60 m, dependiendo de la capacidad de autopurificación del medio receptor. El medio receptor puede ser un río, un lago, un fiordo o el mar.

El emisario empieza generalmente en la cámara de descarga de la zona costera, hacia donde se conducen las aguas residuales por gravedad o bombeo.

Es poco habitual recurrir al bombeo directamente en la tubería de salida y no es recomendable. Si resulta necesario bombear, la mejor solución será bombear las aguas residuales hasta la cámara de descarga y conducir las por gravedad hasta el medio receptor.

El cometido principal de la cámara de descarga es evitar que el aire entre en la tubería. El aire puede provocar la flotación de la tubería debido a la fuerza de empuje.

También conviene tener en cuenta las variaciones de las mareas altas y bajas cuando se diseñe la cámara de descarga.

He aquí algunos problemas especiales a considerar en relación con las tuberías de salida:

- Arrastre de aire hacia el caudal de la tubería.
- Incrustaciones biológicas.
- Fuerzas inducidas por las corrientes y el oleaje.

- Transporte de sedimentos.

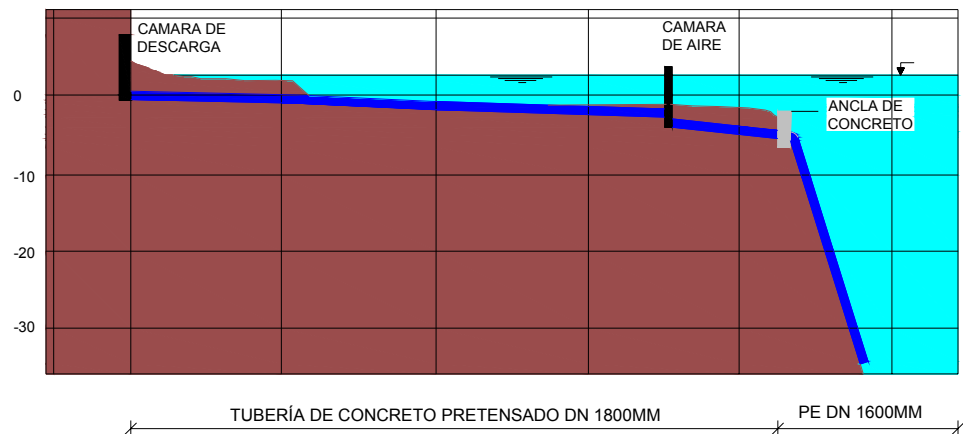
La figura siguiente representa un emisario industrial. En la figura se aprecia el sistema de descarga al mar desde una planta de acero al norte de Noruega. Los principales componentes del sistema de descarga son:

- Tubos de hormigón pretensado de 430 m con diámetro de 1.800 mm enterrados en el lecho marino a una profundidad del agua de 4 m. El extremo marino de la tubería de hormigón está conectado a un macizo de anclaje de hormigón. El extremo terrestre está conectado a una cámara de descarga.
- Tubos de polietileno de 90 m PN3.2 con diámetro de 1.600 mm en el lecho marino inclinado desde el macizo de anclaje hasta una profundidad de 30 m.

La tubería de polietileno fue fabricada, transportada 1.200 km por ferrocarril y sumergida en una pieza. Se seleccionó el polietileno frente a otros materiales para tuberías debido a su flexibilidad y porque precisaba muy poco trabajo de construcción debajo del agua.

El ejemplo superior no es muy característico de un emisario. Normalmente, la tubería de polietileno comienza en la cámara de descarga.

Figura 4.10: Línea de emisario industrial al norte de Noruega



V. VALIDACIÓN DEL DISEÑO DEL EMISOR “CALETA ÑURO”:

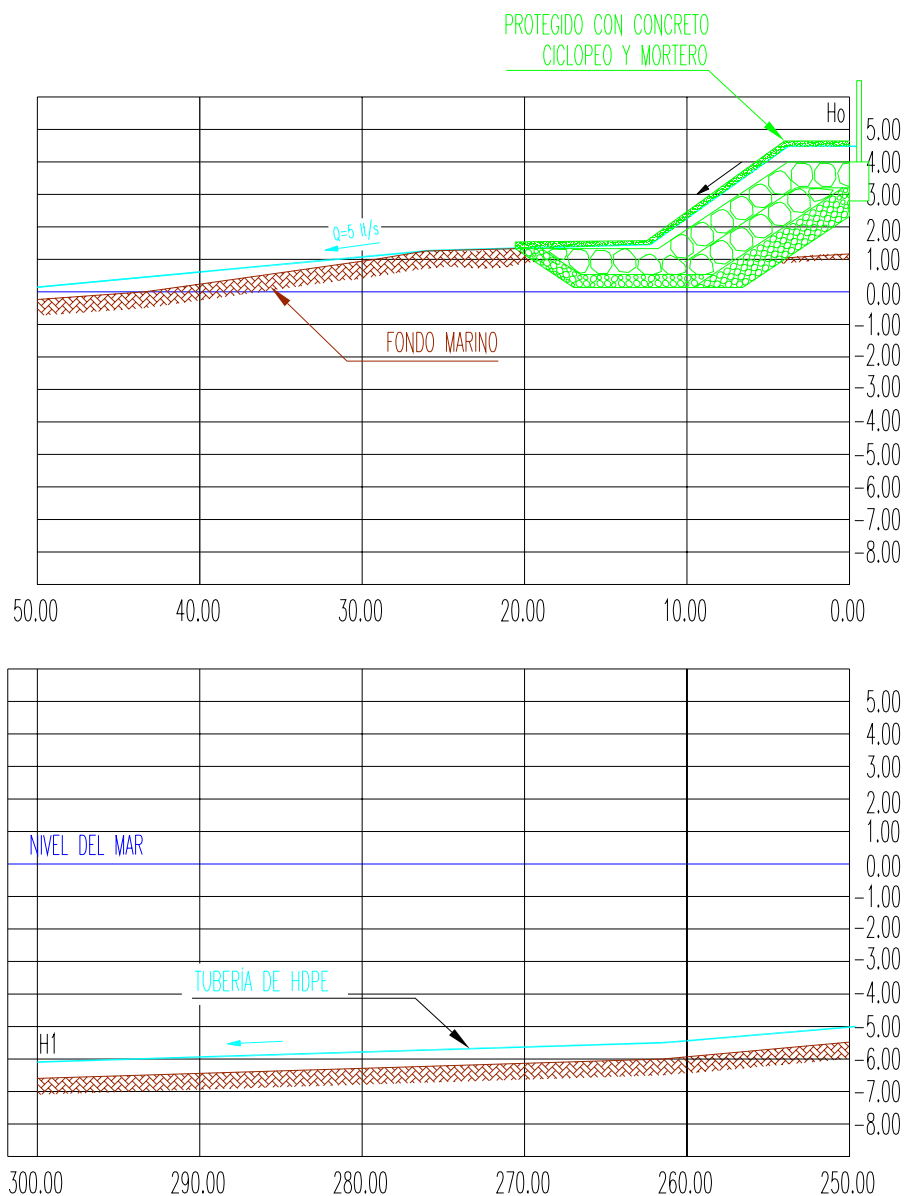
5.1 DATOS INICIALES DEL DISEÑO ORIGINAL:

Caudal de descarga: 5 litros /s

Altura del punto de descarga del tanque respecto al nivel del mar: 4.50 metros

Profundidad de la descarga de la tubería en el fondo del mar (respecto al nivel del mar): 6.20 metros

Figura 5.1: Vista de Perfil del Emisor Submarino



5.2 CALCULOS HIDRAULICOS:

5.2.1 Elección del tipo de tubería - Tipo de material:

Si bien es cierto, la mayoría de las líneas submarinas son fabricadas con tuberías de acero, para este tipo de aplicaciones las tuberías plásticas presentan grandes ventajas comparativas, las cuales ya han sido señaladas líneas arriba. Dentro de las tuberías más comerciales podemos encontrar:

Tubería de PVC para conducción de agua:

Estas tuberías tienen el principal inconveniente de no tener dentro de su composición (resina) elementos que la protejan de la *degradación ultravioleta*, razón por la cual su vida útil en instalaciones expuestas no supera los 2 años. Es posible añadir a la resina de PVC compuestos que la protejan de la radiación UV, sin embargo el costo de esta fabricación especial la hace inviable económicamente (un sobre costo que esta entre el 60-70%)

Por otra parte, su *mediana resistencia química* al agua de mar la hace vulnerable y de poca fiabilidad.

En el plano constructivo, el único sistema de unión viable es la *unión tipo Espiga-Campana* (ver Figura 5.2) con pegamento de unión, que no garantiza una soldadura de igual resistencia que la tubería, convirtiéndola en un sistema de unión poco confiable para estas aplicaciones. El sistema de unión tipo “Unión Flexible” (ver Figura 5.3) con anillo de goma, no pueden ser utilizadas ya que no están preparadas para resistir esfuerzos longitudinales.

Figura 5.2 Unión tipo Espiga Campana



Figura 5.3 Unión tipo Unión Flexible



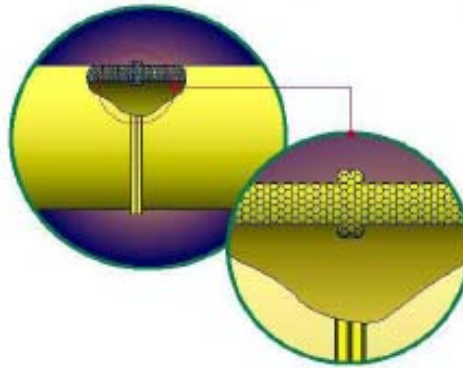
Tubería de HDPE para conducción de agua:

La resina con la cual es fabricada esta tubería tiene un 2-3% de un aditivo especial llamado “Negro de Humo o Carbon Black” (Norma ISO 11420) que le brinda una gran resistencia a la degradación ultravioleta, garantizando así su vida útil por más de 50 años.

Otra ventaja importante es su *altísima resistencia química*, no siendo atacada por el agua de mar ni tampoco por los organismos marinos propios del medio ambiente marino.

Constructivamente hablando, posee uno de los sistemas de unión más confiables, *La termofusión*. Este método de unión que se realiza mediante aporte de calor a ambos extremos de las tuberías para luego ser unidas aplicando presión, forma una unión impermeable y muy segura ya que el espesor de pared en esta zona es mayor que el espesor de la tubería misma (Ver Figura 5.4). Esta característica es muy importante debido a los diversos esfuerzos de tracción y flexión a la que la tubería será sometida, fundamentalmente en los trabajos de lanzamiento y hundimiento.

Figura 5.4 Soldadura por Termofusión



Finalmente, concluimos que la mejor opción por mayor vida útil, resistencia y seguridad es la *Tubería lisa HDPE*.

5.2.2 Cálculo de la presión interna en la tubería:

Sabiendo que la presión que el agua ejerce sobre la tubería es igual al peso del fluido más las pérdidas de carga tenemos:

$$H_g = H_o - H_1$$

Donde:

H_o : Cota correspondiente a la salida del tanque (respecto al nivel del mar).

H_1 : Cota correspondiente a la salida del emisor (respecto al nivel del mar)

$$H_g = 4.5 - (- 6.2) = 10.7 \text{ m}$$

Presión hidrostática = Peso del Agua = $\rho * g * H_g$

Presión hidrostática = 104,860.00 Pascal \approx 1.05 Bar

Acorde con este resultado todas las “clases”⁹ de tubería lisa HDPE podrían cumplir este trabajo, ya que estas son fabricadas para soportar una carga mínima de presión interna de 4 bares (Norma NTP ISO 4427:2000).

5.2.3 Cálculo del diámetro de la tubería:

Para el diseño de emisores submarinos tomaremos el siguiente criterio:

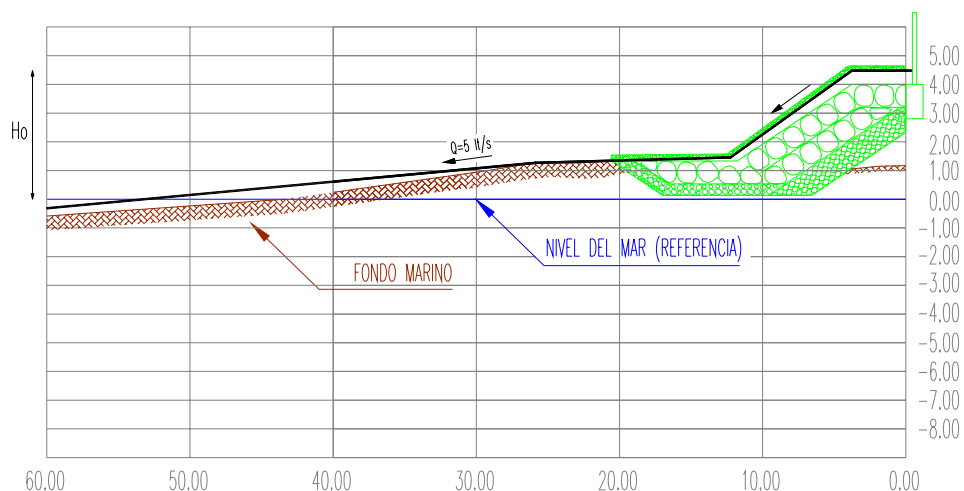
$$H_T \lll H_o$$

Donde:

H_T : Pérdidas de carga total que se producen a lo largo de toda la tubería (m)

H_o : Cota correspondiente a la salida del tanque (respecto al nivel del mar).

Figura 5.5 Perfil de la Tubería HDPE – Parte expuesta



Para este caso práctico consideraremos que la pérdida de carga debe ser menor que la altura H_o , esto para evitar cualquier inconveniente en el funcionamiento de la tubería.

$$H_T' < H_o \dots \dots \dots (5.1)$$

⁹ Se denomina “Clase” de una tubería a la presión nominal de trabajo que la tubería puede soportar como trabajo continuo. Ejemplo: Una tubería de clase 5 es aquella que puede soportar 5 Kg/cm² de presión nominal de trabajo.

reemplazando en la ecuación 5.1 tenemos:

$$H_T' < 4.5$$

Observación:

Solo se considera como fuerza actuante del movimiento del fluido al peso de la columna de agua comprendida entre el nivel del mar y el punto de ingreso a la línea. Esto se debe a que la columna de agua en la altura restante de la tubería (nivel de agua hasta el punto de salida de la tubería) es compensada por el peso del agua de mar sobre el punto de salida.

Utilizando la siguiente ecuación tenemos:

$$D_i'^5 = \frac{8 * Q^2 * f * L}{\pi^2 * g * H_T'} \dots\dots\dots(5.2)$$

Donde:

D_i' : Diámetro interno de la tubería (m)

Q : Caudal (m^3/s).

f : Factor de fricción (valor promedio supuesto, generalmente 0.020m)

L : Longitud total de la línea.

H_T' : Pérdidas de carga total supuesta a lo largo de toda la tubería (m)

considerando los siguientes valores iniciales y reemplazando en la ecuación 5.2, tenemos:

$$Q = 0.005 \text{ m}^3/s$$

$$f = 0.020m$$

$$L = 303 \text{ m}$$

$$H_T' = 2.00m$$

$$D_i' = 0.093 = 93 \text{ mm}$$

Este valor calculado para el diámetro interno de la tubería es aún referencial. Se debe procurar encontrar una tubería que esté por encima de este diámetro, ya que con ello lograremos menores pérdidas de carga.

5.2.4 Elección del tipo de Tubería – Diámetro Comercial:

Según la Norma Técnica Peruana NTP ISO 4427:2000 “Tubos de Polietileno para abastecimiento de agua” en su última versión, existen

dos tipos de tubería que podrían cumplir los requerimientos de presión y diámetro interno antes calculados:

DESCRIPCIÓN	DIÁMETRO EXTERIOR (MM)	ESPESOR (MM)	DIÁMETRO INTERIOR (MM)	PRESIÓN DE TRABAJO (BAR)	RELACIÓN DIMENSIONAL
Tubería lisa HDPE PE-80 Dext. 110mm PN-8	110.00	6.6	97.00	8.00	SDR 17
Tubería lisa HDPE PE-80 Dext. 110mm PN-10	110.00	8.1	94.00	10.00	SDR 13.6

Escogeremos como tubería de trabajo la **Tubería lisa HDPE Dext. 110 mm SDR 13.6** dado que es posible fabricarla en rollos de 100 metros lo cual facilita enormemente su transporte e instalación, haciéndola más económica

Nota:

El criterio para elegir entre una tubería de SDR 17 o SDR 13.6 es un criterio práctico que tiene que ver con el radio de curvatura máximo que puede desarrollar cada tubería. Esto se comprobará en los cálculos subsiguientes.

5.2.5 Cálculo de las pérdidas de carga mayores:

Existen dos fórmulas para poder determinar las pérdidas de carga mayores en la línea de tuberías, siendo la más exacta la ecuación simplificada de Coolebrook (fórmula de Darcy-Weisbach).

$$h_f = f * \frac{L * \bar{v}^2}{Di * 2 * g} \dots\dots\dots(5.3)$$

Donde:

- h_f: Pérdidas de carga mayor a lo largo de toda la tubería (m)
- f: Factor de fricción.
- L: Longitud total de la línea.
- Di: Diámetro interno de la tubería (m).
- v: Velocidad Media (m/s).

El coeficiente de fricción f depende del régimen del flujo, es decir, si el flujo es laminar o turbulento. Se considera que el flujo es laminar cuando el número de Reynolds Re es menor que 2000, de lo contrario será turbulento.

$$Re = \frac{\bar{v} * Di}{\nu} \dots\dots\dots(5.4)$$

Donde:

D_i : Diámetro interno de la tubería (m).

v : Velocidad Media (m/s).

ν : Viscosidad cinemática del fluido (m²/s). Para el agua es 1.01×10^{-6} m²/s.

Calculando la velocidad media:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} = \frac{4 * Q}{\pi * D_i^2} = \frac{4 * 0.005}{\pi * (0.094)^2} = 0.72 \text{ m/s}$$

y reemplazando en la ecuación (5.4), tenemos:

$$Re = \frac{0.72 * 0.094}{1.01 * 10^{-6}} = 67,055 \quad \textbf{Es un flujo turbulento.}$$

La determinación del valor f , utilizando la ecuación de Prandtl y Von-Karman para tuberías lisas:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right) \dots \dots \dots (5.5)$$

Donde:

f : Factor de fricción.

Re : Número de Reynold

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{2.51}{67,055 * \sqrt{f}} \right)$$

después de iterar, calculamos el valor de f :

$$\mathbf{f = 0.0196m}$$

reemplazamos este valor en la ecuación (5.3) y calculamos la pérdidas de cargas mayores en lo largo de la tubería:

$$h_f = 0.0206 * \frac{303 * 0.72^2}{0.094 * 2 * 9.8} = 1.671 \text{ m}$$

5.2.6 Cálculos de las pérdidas de carga menores:

Las pérdidas de carga menores se reducen fundamentalmente a las producidas en la entrada de la tubería (consideraremos una entrada tipo borda) y las pérdidas en el difusor:

$$h_m = k_1 * \frac{\bar{v}^2}{2 * g} + k_2 * \frac{\bar{v}^2}{2 * g} = 0.45m$$

Donde $K_1=1$ y $K_2=16$.

5.2.7 Cálculos de las pérdidas de carga por densidad:

Existe un tercer término que describe la pérdida de carga por densidad, también llamada “resistencia del agua salada”, cuando el agua fluye a un medio receptor donde la densidad del agua (por ejemplo, agua salada) es mayor.

Normalmente, este término sólo se tiene en cuenta cuando se trata de tuberías para emisarios si existe diferencia de densidad entre las aguas residuales y el agua del medio receptor.

La diferencia de densidad puede ser debida al contenido de sal en el agua o a diferencias de temperatura.

$$h_p = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_a} * H_1 \dots \dots \dots (5.6)$$

Donde:

- ρ_m : Densidad del agua de mar (normalmente es 1025 kg/m^3).
- ρ_a : Densidad de las aguas residuales (normalmente es 1000 kg/m^3).
- H_1 : Profundidad de descarga (m).

reemplazando tenemos:

$$h_p = \frac{1025 - 1000}{1000} * 6.2 = 0.155m$$

Como puede verse, la resistencia del agua salada alcanza un valor significativo y ha de tenerse en cuenta siempre en las tuberías para emisarios que descargan a medios receptores de agua salada.

5.2.8 Cálculo de la Pérdida de carga Total:

Las pérdida de carga tota es la sumatoria de las pérdidas mayores, las menores y por densidad

$$H_T = h_f + h_m + h_p$$

$$H_T = 1.671 + 0.45 + 0.155 = 2.276m$$

Como podemos apreciar $H_T < H_o$, con lo cual comprobamos que la elección de la tubería ha sido la correcta.

5.2.9 Cálculo de la capacidad de autolimpieza de la tubería:

Para obtener una buena auto-limpieza en la línea, el objetivo fundamental de un proyecto consiste en garantizar una condición de escurrimiento tal, que por lo menos una vez por día propicie la auto-limpieza de las tuberías a lo largo del período de proyecto.

Para ello podemos utilizar uno de los dos criterios que actualmente son válidos para este fin: “velocidad de autolimpieza” y “Esfuerzo tractivo”. Para el presente trabajo tomaremos como criterio la “velocidad de autolimpieza” ya que es un criterio práctico que no requiere de mayor información acerca de las características del sedimento.

De acuerdo con este criterio, para obtener una buena auto-limpieza en una tubería, la velocidad del líquido en su interior, debe ser como **mínima de 0,90 m/s**, que además de impedir la sedimentación del material sólido (arena) en la tubería, es capaz de remover y arrastrar la arena ya depositada.

Si la velocidad es igual a 0,90 m/s, es capaz de arrastrar la arena sedimentada en la tubería, la ocurrencia de valores de velocidad superiores a 0,90 m/s, por lo menos una vez al día, con mayor razón producirán la auto-limpieza en la tubería, y evitará la formación de depósitos de material sólido que puede obstruir la tubería.

Un criterio de dimensionamiento, que está siendo adoptado con éxito en Brasil, es el de garantizar una **velocidad media igual o superior a 0,60 m/s**, a lo largo de todo el período de Proyecto.

Este criterio, da resultados próximos a aquellos obtenidos por el uso del criterio considerado racional de garantizar la autolimpieza con velocidad de 0,90 m/s para el caudal máximo de un día cualquiera.

La velocidad máxima, es función de las características del material y de la carga disponible, de un modo general, la misma no debe ser mayor a 3,0 m/s.

De los cálculos anteriores sabemos que la velocidad media es:

$$\bar{v} = 0.72m / s$$

Por lo cual, al ser mayor que 0.6m/s, **debemos esperar que no se forme sedimento en la tubería.**

5.3 CALCULOS DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA TUBERÍA:

5.3.1 Cálculo del espesor requerido de la tubería:¹⁰

Calculamos el espesor de pared de la tubería requerida para soportar la presión hidrostática, según los datos obtenidos anteriormente:

Presión interna en la tubería (P_i) = 1.05 Bares = 0.105 MPa

Consideraremos la utilización de la resina de Polietileno PE-80 la cual posee una característica mecánica llamada “Mínimo Esfuerzo Requerido- MRS” de 8.0 MPa (Información tomada de la Norma ISO 4427, “Table 1 – Designation of material”), con la cual podremos calcular el espesor utilizando la siguiente fórmula:

$$e = \frac{P_i * D_e}{2 * \sigma_r + P_i} \dots\dots\dots(5.6)$$

Donde:

- e: Espesor de la tubería (m).
- P_i : Presión interna en la tubería
- D_e : Diámetro exterior (m)
- σ_r : Tensión tangencial (MPa).

La tensión tangencial es la relación entre el Mínimo esfuerzo requerido entre un coeficiente de seguridad (C) que generalmente esta definido con un valor de 1.25 para agua (se puede encontrar esta información en la Norma ISO 4427, “Table 2 – relationship between MRS and design coefficient C at 20°C).

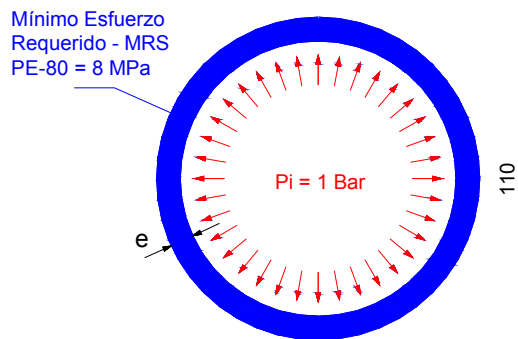


Figura 5.6 Presión interna del fluido dentro de una Tubería

¹⁰ Este ejercicio es solamente referencial debido a que normalmente se tendrá que elegir una tubería de una “clase” comercial con un espesor definido por la norma correspondiente (NTP ISO 4427:2000). Solamente si la cantidad de tubería es muy grande se podría fabricar una tubería de una “clase” especial fuera de norma, clase 7.5 por ejemplo, ahorrando con ello cantidades importantes de dinero.

Tomando en consideración que la tubería trabajará bajo una serie de esfuerzos producto de la marea: oleaje, presión hidrostática de la columna de agua, empuje, etc.; consideraremos un factor de seguridad de por lo menos 3.

$$\sigma_r = \frac{MRS}{C} = \frac{8}{3} = 2.67 MPa$$

reemplazando en la ecuación (5.6), tenemos:

$$e = \frac{0.105 * 0.11}{2 * 2.67 + 0.105} = 0.0021m = 2.1mm$$

Dado que nosotros ya escogimos la Tubería Lisa HDPE Dext. 110mm PN-10 que tiene un espesor de 8.1mm (según Norma Técnica Peruana NTP ISO 4427:2000) como material de trabajo para este diseño, obtenemos que el **Factor de Seguridad para el espesor de la tubería es de 12.**

5.3.2 Cálculo de los esfuerzos en la dirección longitudinal:

La presión interna producirá una deformación en la dirección longitudinal si la tubería tiene libertad de movimiento. La tubería tenderá a acortarse debido a la contracción:

Si no existen fuerzas de fricción actuando contra el movimiento, no se producirá un esfuerzo permanente en la dirección longitudinal y el acortamiento ΔL se desarrollará plenamente.

Este es el caso de una tubería colocada en superficie y que flota libremente:

$$\Delta L = \frac{\nu * L * P_i}{2 * E_k} * \left(\frac{D_{ext.}}{e} - 1 \right) \dots \dots (5.7)$$

Donde:

- ν : Coeficiente de Poisson (para tuberías HDPE 0.4-0.5)
- L: Longitud (m).
- P_i : Presión interna en la tubería
- E_k : Módulo de elasticidad del material (PE-80 es de 800 MPa).
- De: Diámetro exterior (m)
- e: Espesor de la tubería (m).

reemplazando en la ecuación 5.7:

$$\Delta L = \frac{-0.5 * 303 * 0.105}{2 * 800} * \left(\frac{0.11}{0.0081} - 1 \right) = -0.125m$$

Como puede apreciarse, el acortamiento no es importante, debido a que la presión interna dentro de la tubería es mínima. Para presiones mayores el acortamiento podría ser importante, y si el Stub End¹¹ del extremo de esta tubería no es resistente a la tensión, se producirán fugas. Vemos también que el resultado es independiente del diámetro.

En la mayoría de los casos, el movimiento de la tubería se evita mediante bloques de anclaje, cobertura con tierra, etc. Ello significa que se producirán esfuerzos en la dirección longitudinal.

El máximo esfuerzo aparece cuando el alargamiento es cero:

$$\sigma_L = \nu * \sigma_r = \nu * \frac{P_i}{2} * \left(\frac{D_e}{e} - 1 \right) \dots \dots \dots (5.8)$$

Donde:

- σ_L : Esfuerzo longitudinal (MPa).
- σ_r : Tensión tangencial (MPa).
- ν : Coeficiente de Poisson (para tuberías HDPE 0.4-0.5)
- e : Espesor de la tubería (m).
- P_i : Presión interna en la tubería
- D_e : Diámetro exterior (m)

$$\sigma_L = 0.5 * \frac{0.105}{2} * \left(\frac{0.11}{0.0081} - 1 \right) = 0.33MPa$$

Para este caso en particular el esfuerzo longitudinal es mínimo.

El esfuerzo longitudinal descenderá con el tiempo debido a la relajación que se produce en el polietileno. Esto se debe a una deformación permanente, mientras el módulo de elasticidad se reduce con el tiempo. Este hecho puede verse con la ley de Hook:

$$\sigma \downarrow = E_k \downarrow * \varepsilon$$

Esta afirmación es sencilla de comprobar haciendo una comparación del esfuerzo longitudinal obtenido para una carga de corta duración y el mismo esfuerzo para cargas de larga duración. Calcularemos primero la deformación longitudinal en el momento en que se produce el esfuerzo, para ello utilizaremos el Módulo de elasticidad del HDPE PE-80 para cargas de corta duración: $E_{KC}=800$ MPa:

¹¹ Es un accesorio de polietileno que se une al extremo de una tubería mediante termofusión para servir como tope a una brida cuando se requiere unir las tuberías mediante bridas o unir las a válvulas.

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_{Kc}} = \frac{0.33}{800} = 0.00041m = 0.41mm$$

Finalmente, calcularemos el esfuerzo longitudinal después de 50 años de funcionamiento. Utilizaremos para ello el Modulo de elasticidad del HDPE PE-80 para cargas de larga duración: $E_{KL}=150 \text{ MPa}$:

$$\sigma_{L, largo_plazo} = \varepsilon_L * E_{KL} = 0.00041 * 150 = 0.0615 \text{ MPa}$$

Como podemos apreciar el esfuerzo longitudinal a largo plazo es el 18.6% del mismo esfuerzo a corto plazo. La relajación es significativa, en comparación con la tensión circular, que es constante a lo largo del tiempo.

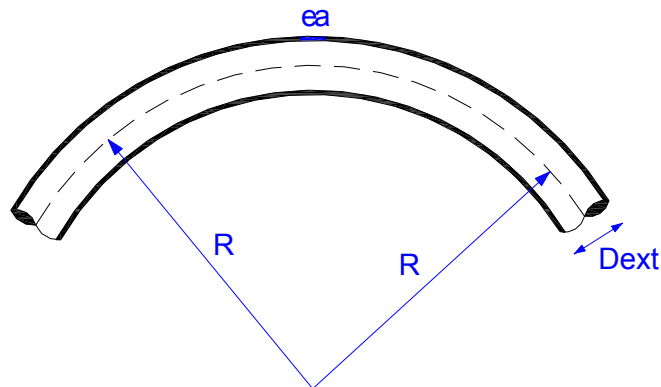
5.3.3 Cálculo del radio de curvatura optimo de la tubería:

Una tubería de PE, gracias a su flexibilidad, puede doblarse hasta un determinado grado de curvatura. No obstante, hay un radio mínimo que no puede sobrepasarse si quiere evitarse el colapso.

Durante la flexión se producirán tensiones y deformaciones tanto en dirección longitudinal como radial. Cuando el radio de curvatura es demasiado pequeño, la tubería se doblará. Especialmente durante el proceso de hundimiento de una tubería subacuática, es necesario asegurarse de que el radio de curvatura es mayor que el radio crítico de doblado.

Durante la instalación, el equilibrio entre fuerzas - peso de los bloques de hormigón, fuerzas originadas por los barcos, fuerzas hidráulicas, fuerzas de las corrientes y el oleaje u otras fuerzas – define la configuración y la curvatura máxima.

Figura 5.7 Tubería de PE bajo flexión pura



Cuando una tubería se dobla hasta una curvatura de radio R en la dirección axial, se producirá una deformación ε_a en la pared de la tubería. Esta deformación puede expresarse de la siguiente manera:

$$\varepsilon_a = \frac{r_{ext}}{R_c} = \frac{D_{ext}}{2 * R_c}$$

Donde:

Rc: Radio de curvatura de la tubería.

La tensión máxima en la pared de la tubería puede calcularse con la ley de Hook:

$$\sigma_c = E_K * \varepsilon_a = E_K * \frac{D_e}{2 * R_c} \Rightarrow \sigma_{c \max} = E_K * \frac{D_e}{2 * R_{c \min}} \dots\dots\dots(5.9)$$

Donde:

σ_c : Esfuerzo tracción en la tubería (MPa).

E_K : Módulo de elasticidad (PE-80 es 800 MPa, PE-100 es 1050MPa).

De: Diámetro exterior (m)

La tensión de tracción en la curva exterior y compresión en la interior. El valor de la tensión disminuirá con el tiempo debido a la relajación del polietileno.

La tensión de reventón para cargas de corta duración para las tuberías de polietileno son:

PE-80: $\sigma_c = 13 \text{ MPa}$.

PE-100: $\sigma_c = 15 \text{ MPa}$.

Si reemplazamos estos valores en la ecuación 5.9, tenemos:

PE-80: $R_{c \min} = 30 * D_e \dots\dots\dots(5.10a)$

PE-100: $R_{c \min} = 35 * D_e \dots\dots\dots(5.10b)$

Para efectos prácticos, un radio de curvatura de 35 veces el diámetro exterior de la tubería puede considerarse como radio mínimo para una tubería de PE durante su hundimiento (para $\text{SDR}^{12} < 26$)¹³:

¹² SDR=Relación dimensional, que es el cociente del diámetro exterior entre el espesor de la tubería.

¹³ Se considera este valor como máximo debido a que por encima de este valor el espesor de pared es tan delgado que es incapaz de soportar esfuerzos de tracción regulares, generando grietas en la pared de la tubería.

$$R_{c_{\min}} = 35 * D_e = 35 * 0.11 = 3.85m$$

En conclusión, en situaciones con cargas combinadas, por ejemplo, cargas por presión, por temperaturas, oleaje, etc., se recomienda un radio de curvatura óptimo:

$$R_{c_{opt}} = 60 * D_e = 60 * 0.11 = 6.6m$$

reemplazando este valor en la ecuación 5.9, tenemos:

$$\sigma_{c_{opt}} = 800 * \frac{0.11}{2 * 6.6} = 6.67MPa$$

Por lo tanto el coeficiente de seguridad contra roturas es $F = 13/6.67 = 1.95$.

5.3.4 Pandeo¹⁴ de la tubería durante la flexión:

Cuando una tubería esta expuesta a una flexión continuada, tarde o temprano acabará sufriendo pandeo. Teóricamente hay dos casos posibles:

- Pandeo axial
- Pandeo radial

Para tuberías subacuáticas, la deformación por pandeo radial será crítica a no ser que la presión interna sea importante.

La deformación crítica para el pandeo radial en el estado de flexión pura puede expresarse de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{cri,r} = 0.28 * \left[\frac{e}{D_m} \right] = \dots\dots\dots(5.10)$$

Donde:

e: Espesor de pared de la tubería (m).

Dm: Diámetro medio (m)

La relación entre la deformación axial y la radial viene dada por el índice de Poisson:

¹⁴ El término pandeo es utilizado por la literatura técnica especializada para describir deformaciones drásticas en la sección de la tubería debido a la flexión para este caso. Ver "Manual Técnico para Instalaciones Submarinas para tuberías de polietileno" de la Empresa Pipelife Norge AS.

$$\varepsilon_r = \nu * \varepsilon_a \dots\dots\dots(5.11)$$

Si reemplazamos la ecuación 5.11 en la ecuación 5.10, para un valor de coeficiente de Poisson de 0,50 podemos obtener la deformación crítica en la dirección axial:

$$\varepsilon_{cri,a} = \frac{0.28}{\nu} * \left[\frac{e}{D_m} \right] = \frac{0.56}{SDR - 1} \dots\dots\dots(5.12)$$

Si combinamos la ecuación 5.12 y la ecuación 5.9 podemos obtener la Relación de Flexión Crítica para una tubería de PE en la dirección axial:

$$a_{crit} = \frac{R}{D_{ext}} = \frac{SDR - 1}{1.12} = 0.89 * (SDR - 1)$$

Para estos cálculos es normal introducir el coeficiente de seguridad F =2. Por tanto, la relación de flexión permisible sería:

$$a_{permisible, F=2} = \frac{R}{D_{ext}} = 1.78 * (SDR - 1) \dots\dots\dots(5.13)$$

Utilizando la ecuación 5.13 podemos confeccionar una Tabla con la relación de flexión permisible (R/D) para las clases de SDR, suponiendo un coeficiente de seguridad de 2:

Tabla 5.1. Relación de flexión permisible durante el hundimiento

SDR	RELACIÓN DE FLEXIÓN PERMISIBLE R/D_{ext} – F=2
33	57
21	36
17	28
13.6	22
11	18
9	14

Para nuestro problema hemos utilizado una tubería de un SDR 13.6, por lo que la Relación de flexión permisible sería 22. Despejando

podemos concluir que el **radio de curvatura mínimo permisible seria de 2.42m¹⁵**.

Observación:

Podemos observar de la ecuación 5.13 que los valores de la Relación de Flexión Permisible son directamente proporcionales al SDR de la tubería. Es decir, para un mismo diámetro de tubería es preferible escoger un espesor mayor que te permita tener radios de curvatura permisible menores. Esta es una de las razones por la que se decidió escoger un SDR 13.6 en lugar de uno mayor.

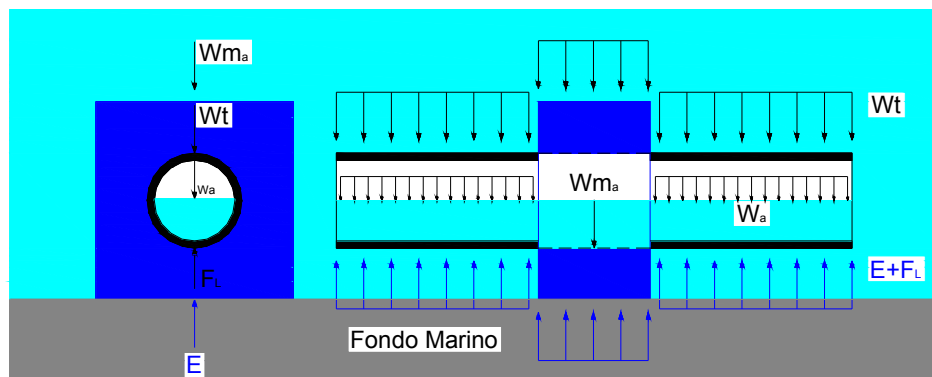
5.4 CALCULOS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS LASTRES DE CONCRETO:

5.4.1 Cálculo del espaciamiento entre lastres de concreto:

Para calcular el espaciamiento entre los lastres de concreto, realizaremos el análisis de cuerpo libre de la tubería en el fondo marino, haciendo una semejanza con sistemas de cargas distribuidas para una tubería suspendida con soportes:

$$\delta = \frac{q * L^4}{6 * \pi * E_K * (D_{ext}^4 - D_{int}^4)} \dots\dots\dots(5.14)$$

Figura 5.8 Análisis de cuerpo libre de la Línea en el Fondo Marino



Carga debido al peso de la tubería:

¹⁵ Las tuberías de Polietileno de alta densidad pueden fabricarse en rollos de 1.2m de diámetro en longitudes de hasta 100 metros. Esto se debe a que la tubería es enrollada justo después de salir de la línea de producción cuando aún se encuentra con una temperatura entre 40-50°C donde el material es mucho más flexible.

$$W_t = \frac{D_{ext}^2 - D_{int}^2}{4} * \pi * \gamma_t = \frac{0.11^2 - 0.094^2}{4} * \pi * 9,600 = 24.61 N / m$$

Carga debido al peso del agua dentro de la tubería:

$$W_a = \frac{\pi * D_{int}^2}{4} * \gamma_a = 69.29 N / m$$

Donde:

D_{int} : Diámetro interior de la tubería (m)

γ_a : Peso específico del agua dentro de la tubería (N/m³) ($\rho_a = 1,000 \text{ Kg/m}^3$)

Empuje estático del agua de mar:

Calcularemos el empuje del agua de mar por metro lineal de tubería:

$$E = \frac{\pi * D_{ext}^2}{4} * \gamma_{am} = 97.67 N / m$$

Donde:

D_{ext} : Diámetro exterior de la tubería (m)

γ_{am} : Peso específico del agua de mar (N/m³) ($\rho_{am} = 1,025 \text{ Kg/m}^3$)

Fuerza de sustentación debido a la corriente:

Existen fuerzas adicionales que son de gran importancia en el diseño de líneas submarinas, las fuerzas debidas a las corrientes y al oleaje¹⁶.

La fuerza debida a la corriente causará fuerzas de resistencia al avance y de sustentación. Para una tubería tendida de forma estable sobre el fondo marino, puede considerarse que las fuerzas están uniformemente distribuidas a lo largo del tramo de la tubería entre los soportes (contrapesos de hormigón), pero limitado por la longitud de cresta de las olas.

La magnitud de estas fuerzas puede describirse a groso modo mediante la fórmula:

$$F_L = \frac{1}{2} * C_L * D_{ext} * \rho_m * v_m^2 \dots\dots\dots(5.15a)$$

$$F_D = \frac{1}{2} * C_D * D_{ext} * \rho_m * v_m^2 \dots\dots\dots(5.15b)$$

¹⁶ Los cálculos de las fuerzas de las corrientes que actúan sobre una tubería pueden ser complicados. Trataremos un método simplificado para calcular estas fuerzas.

Donde:

F_L : Fuerza de sustentación por metro lineal (N/m).

F_D : Fuerza de arrastre por metro lineal (N/m).

C_L : Coeficiente de sustentación.

C_D : Coeficiente de arrastre.

ρ_m : Densidad del agua de mar (normalmente es 1025 kg/m^3).

v_m : Velocidad del agua de mar.

Los coeficientes F_D y F_L en principio dependen del numero Reynolds y de la rugosidad del fondo. El número Reynolds puede expresarse:

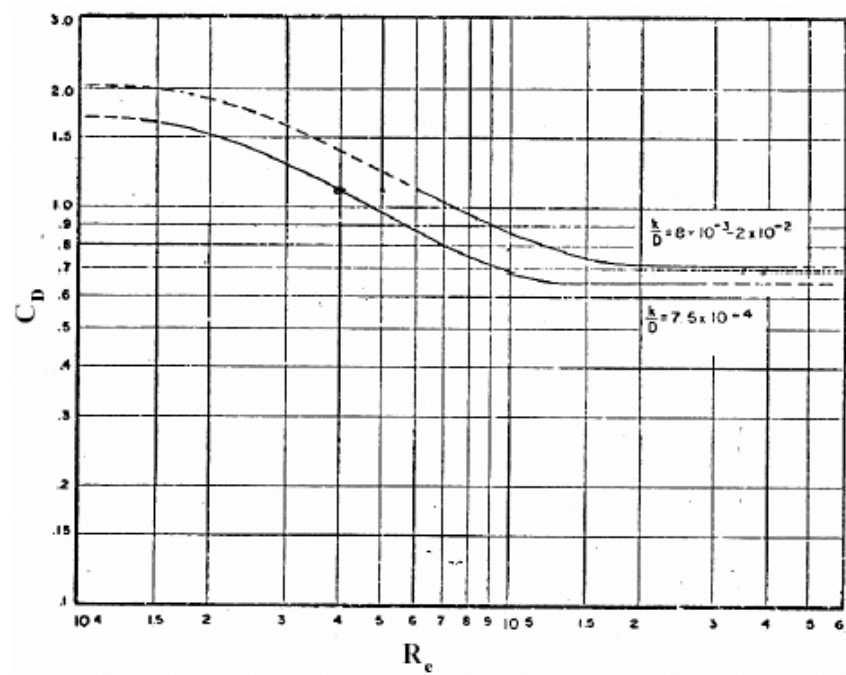
$$Re = \frac{v_m * D_{ext}}{\nu} \dots\dots\dots(5.16)$$

Considerando que la velocidad del agua de mar es $v_m = 1 \text{ m/s}$ ¹⁷; reemplazando valores en la ecuación 5.16 tenemos que el numero de **Reynolds es 1.09×10^{-5}** .

Normalmente, los coeficientes variarán entre 0,5 – 1,2. Los valores para una tubería tendida sobre el fondo marino pueden obtenerse de las Figuras 5.9a y 5.9b.

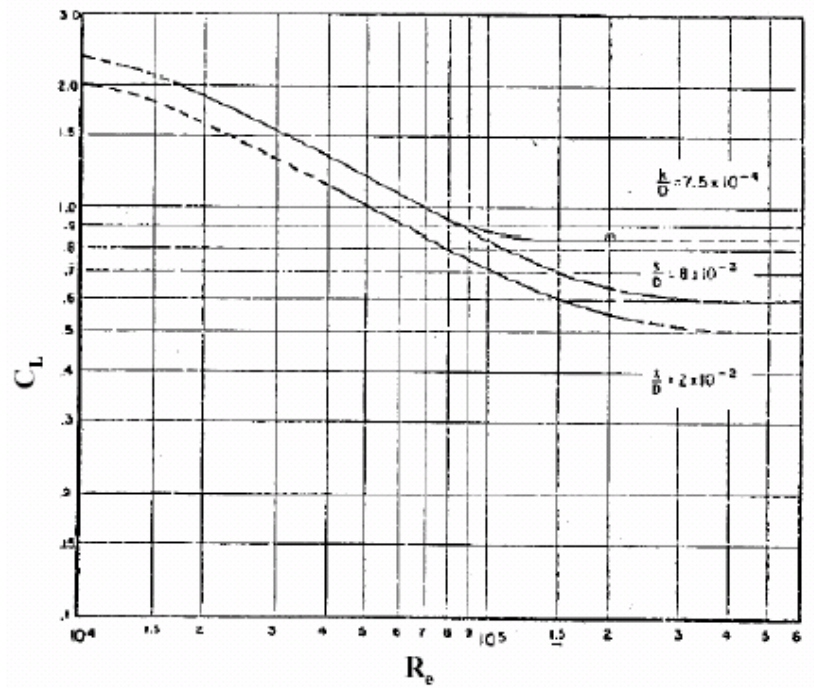
Entonces tenemos que los valores de los coeficientes son: $C_L = 0.7$ y $C_D = 0.7$. Reemplazando estos valores en las ecuaciones 5.15a y 5.15b tenemos:

Figura 5.9a: Coeficiente de arrastre, C_D Vs. Re



¹⁷ Se considera un valor de la velocidad de la corriente en el fondo marino de 1 m/s como el máximo posible para las condiciones normales de nuestro mar.

Figura 5.9b: Coeficiente de arrastre, C_L Vs. Re



$$F_L = \frac{1}{2} * 0.7 * 0.11 * 1025 * 1^2 = 39.46 N / m$$

$$F_D = \frac{1}{2} * 0.7 * 0.11 * 1025 * 1^2 = 39.46 N / m$$

Finalmente la resultante total de sustentación será:

$$q = R_s^+ = F_L + E - W_t - W_a \dots \dots \dots (5.17)$$

$$q = R_s^+ = 39.46 + 97.67 - 24.61 - 69.29 = 43.53 N / m$$

Despejando "l" de la ecuación 5.14 y limitando la relación entre el espaciamiento (l) y la flecha (δ) en un determinado valor: $\delta/l = 1/600$, resulta en flechas no perceptibles a simple vista, tenemos:

$$l < \sqrt[3]{\frac{6 * \pi * E * (D_{ext}^4 - D_{int}^4) * (1/600)}{R_s}} < 3.4m$$

Por lo tanto, el espaciamiento entre los lastres de concreto deberá ser menor a 3.4m. **Para este proyecto en particular tomaremos un espaciamiento de 2.25m, lo cual nos brinda un factor de seguridad de 1.71.**

Observación:

De los resultados obtenidos llegamos a la conclusión que la Fuerza debida a la sustentación tiene una influencia muy importante en la estabilidad de la tubería en el fondo marino.

5.4.2 Cálculo del peso de los lastres de concreto:

La idea principal para hacer el cálculo del peso es la siguiente: *“El lastre de concreto debe ser suficientemente liviano para permitir la flotación de la línea al momento del lanzamiento y suficientemente pesado para mantener la línea estable en el fondo marino”*; es decir, debe estar en un rango de pesos que está determinado entre dos parámetros: Flotabilidad y Estabilidad de la línea.

Estabilidad en el fondo marino:

Se debe hacer un análisis de cuerpo libre sobre el fondo marino, utilizamos para ello la figura 5.8:

$$R_f^- = W_t + W_{m_a} + W_a - E - F_L \dots\dots\dots (5.18)$$

Donde:

R_f^- : Resultante de fijación (N) – siempre negativa

W_t : Peso de la tubería fuera del agua (N)

W_{m_a} : Peso aparente del lastre sumergido (N).

W_{am} : Peso del agua de mar dentro de la tubería (N).

E : Empuje del agua sobre la tubería (N).

F_L : Fuerza de sustentación (N).

Para mantener la línea estable en el fondo marino, la ecuación 5.18 debe tomar la siguiente forma:

$$W_{m_a}^- > F_L + E - W_t - W_a \dots\dots\dots (5.18a)$$

Se debe notar que los valores antes calculados eran por metro lineal de tubería, debiendo ser multiplicados por el espaciamiento entre los lastres de concreto para poder reemplazarlos en la ecuación 5.18a:

$$W_{m_a}^- > (39.46 + 97.67 - 24.61 - 69.29) * 1.5 = 65.30N$$

De la ecuación elemental de empuje tenemos:

$$Wm^- > \frac{Wm_a^-}{\gamma_c - \gamma_{am}} * \gamma_c$$

Donde:

Wm^- : Peso del lastre fuera del agua (N).

Wm_a^- : Peso aparente del lastre sumergido (N).

γ_c : Peso específico del concreto (N/m³) ($\rho_c = 2,400 \text{ Kg/m}^3$)

γ_{am} : Peso específico del agua de mar (N/m³) ($\rho_{am} = 1,025 \text{ Kg/m}^3$)

Reemplazando tenemos:

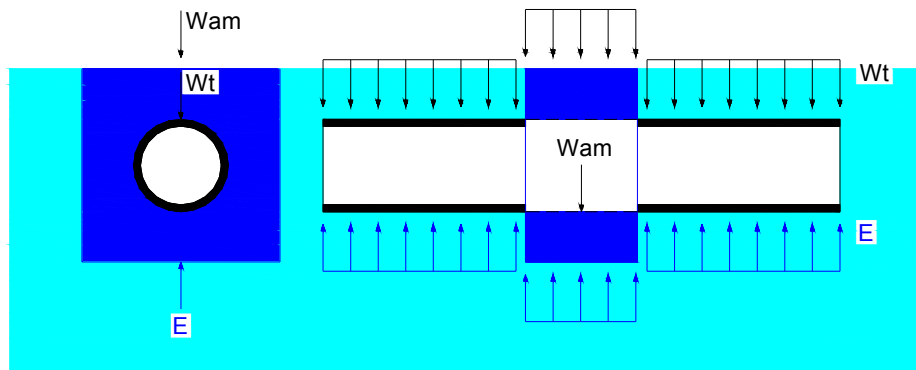
$$Wm^- = \frac{65.30}{24,000 - 10,250} * 24,000 = 113.98N$$

El peso del lastre de concreto debe ser mayor a 113.98N (11.63 Kgf) para mantener la línea estable en el fondo marino. Si el peso del lastre fuese menor del obtenido entonces la línea no se mantendría fija al fondo marino.

Flotabilidad:

Haciendo un análisis de cuerpo libre a la línea en flotación y considerando que el agua de mar cubre totalmente el lastre de concreto en el momento del lanzamiento tenemos:

Figura 5.10 Análisis de cuerpo libre de la Línea en Flotación



$$R_f^+ = E - W_t - Wm_a \dots\dots\dots(5.19)$$

Donde:

R_f^+ : Resultante de flotación (N) – siempre positivo.

E : Empuje del agua sobre la tubería (N)

W_t : Peso de la tubería fuera del agua (N)

Wm_a : Peso aparente del lastre sumergido (N).

Para mantener la línea en flotación la ecuación 5.19 debe tomar la siguiente forma:

$$Wm_a^+ < E - W_t \dots \dots \dots (5.19a)$$

Se debe notar que los valores antes calculados eran por metro lineal de tubería, debiendo ser multiplicados por el espaciamiento entre los lastres de concreto para poder reemplazarlos en la ecuación 5.19a:

$$Wm_a^+ < (97.67 - 24.61) * 1.5 = 109.59N$$

De la ecuación elemental de empuje tenemos:

$$Wm^+ < \frac{Wm_a^+}{\gamma_c - \gamma_{am}} * \gamma_c$$

Donde:

W_m^+ : Peso del lastre fuera del agua (N).

Wm_a^+ : Peso aparente del lastre sumergido (N).

γ_c : Peso específico del concreto (N/m³) ($\rho_c = 2,400 \text{ Kg/m}^3$)

γ_{am} : Peso específico del agua de mar (N/m³) ($\rho_{am} = 1,025 \text{ Kg/m}^3$)

Reemplazando tenemos:

$$Wm^+ < \frac{109.59}{24,000 - 10,250} * 24,000 = 191.28N$$

*El peso del lastre de concreto debe ser menor a 191.28N (19.52 Kgf) para mantener la línea en flotación. Si el peso del lastre de concreto excediese este peso entonces la línea se hundiría durante el lanzamiento haciendo imposible su colocación por flotación simple en el lugar requerido. **Por lo tanto elegiremos que el peso del lastre será de 180N (18.4 Kgf).***

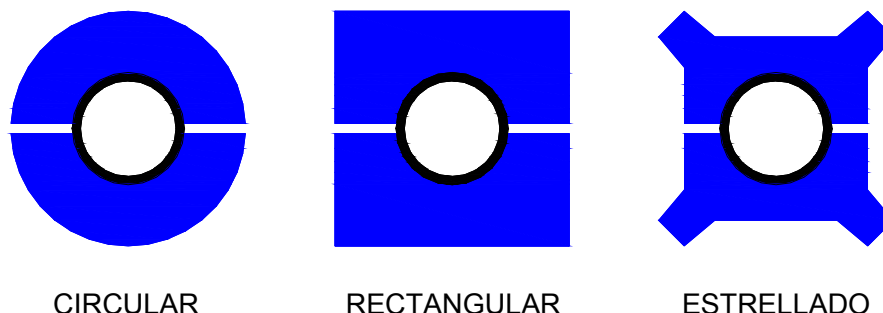
5.4.3 Tipos de Lastres de concreto:

Dependiendo de su forma, tres son los tipos de contrapesos de hormigón más comunes:

- Rectangulares.

- Circulares
- Estrellados

Figura 5.11 Tipos de Lastres de Concreto



Es evidente que los contrapesos mostrados en la Fig. 5.11 tendrán un agarre distinto sobre el fondo marino cuando se sometan a la fuerza de las corrientes o del oleaje.

El contrapeso rectangular es el formato clásico. Presenta un buen rendimiento global y puede utilizarse en la gran mayoría de casos. **Este tipo de lastre es el que utilizaremos en nuestro proyecto.**

Los contrapesos circulares se utilizan en zanjas, en aguas tranquilas y en lugares donde se lleva a cabo pesca y anclaje.

Los contrapesos en forma de estrella pueden aplicarse con éxito en casos en los que el impacto de las olas y de las corrientes es importante. Su forma les da una estabilidad añadida.

A continuación enumeramos los coeficientes de fricción aproximados para los tres tipos de contrapesos de hormigón:

Tabla 5.2. Coeficiente de fricción para distintos tipos de lastres¹⁸

TIPO DE LASTRE	COEFICIENTE DE FRICCIÓN
Circulares	0.2
Rectangulares	0.5
Estrellados	0.8

5.4.4 Cálculo de la resistencia al arrastre de la línea:

Hasta el momento ya hemos logrado asegurar que la línea se mantendrá una resultante contra el fondo marino, logrando así una estabilidad respecto a las fuerzas que tienden a hacerla flotar. Ahora

¹⁸ Estos valores son obtenidos de la experiencia práctica europea para fondos marinos arenosos.

tenemos que comprobar que la línea mantendrá su estabilidad respecto a la fuerza de arrastre de la corriente.

La fuerza que se opone al arrastre de la corriente es la fuerza de fricción que se genera entre la base del lastre del concreto y el fondo marino. Esta fuerza se puede calcular de la siguiente manera:

$$F_f = N * \mu \dots\dots\dots(5.20)$$

Donde:

N: Fuerza normal (N).

μ : Coeficiente de fricción entre el lastre de concreto y el fondo marino (0.5 para lastres rectangulares).

La fuerza normal no es más que la resultante obtenida de resolver la ecuación 5.18 para el tramo de tubería escogido:

$$N = R_f = Wm_a + (W_t + W_a - E - F_L) * l \dots\dots\dots (5.21)$$

Sin embargo, dado que en la ecuación 5.21 el peso requerido es el peso aparente del lastre, tendremos que calcularlo de la siguiente ecuación:

$$Wm_a = \frac{Wm}{\gamma_c} * (\gamma_c - \gamma_{am}) = \frac{180}{24,000} * (24,000 - 10,250) = 103.13 N$$

reemplazando los valores hallados en la ecuación 5.21, tenemos:

$$N = R_f = 103.13 + (24.61 + 69.29 - 97.67 - 39.46) * 1.5 = 39.29 N$$

reemplazando el valor de la normal en la ecuación 5.20:

$$F_f = 39.29 * 0.5 = 19.65 N$$

Sabemos que la fuerza de arrastre F_D para el espaciamiento elegido de 1.5m es:

$$F_D * l = 39.46 * 1.5 = 59.19 N$$

Por lo tanto el factor de seguridad contra al arrastre será $f_a = 19.65 / 59.19 = 0.33$, lo cual quiere decir que el peso del lastre de concreto no

es suficiente para evitar el arrastre que se produciría en el fondo marino debido a la corriente.

Para incrementar el factor de seguridad es necesario tener un lastre de mayor peso, pero debe tenerse cuidado en mantener el equilibrio en el análisis de flotabilidad de la línea de lo contrario la misma no flotaría durante las maniobras de lanzamiento. Para compensar el peso adicional del lastre durante el lanzamiento utilizaremos elementos que ayuden a su flotación, los cuales pueden ser: bolsas, cilindros, líneas auxiliares, etc.. Para nuestro caso en particular utilizaremos **líneas auxiliares**.

Concluimos con el resultado obtenido que para una tubería de 110mm de diámetro exterior siempre se requiere elementos de flotación adicionales, siendo la mejor opción la utilización de líneas auxiliares. El número de las líneas auxiliares va a depender de los cálculos correspondientes y de la logística que se posee¹⁹.

5.4.5 Cálculo de líneas auxiliares:

Para determinar la cantidad de líneas auxiliares y la dimensión de cada una de ellas, debemos seguir los siguientes pasos:

- Determinar el peso requerido del lastre.
- Determinar la fuerza de flotación requerida.
- Determinar la cantidad y dimensiones de las líneas auxiliares.

Determinación del peso requerido del lastre:

Para un factor de seguridad al arrastre de 1, tenemos:

$$f_a = \frac{F_f'}{F_D * l} = 1 \Rightarrow F_f' = F_D * l = 59.19N$$

reemplazando en la ecuación 5.19 y despejando la nueva normal en el fondo marino tenemos:

$$N' = \frac{F_f'}{\mu} = \frac{59.19}{0.5} = 118.38N$$

reemplazando en la ecuación 5.17a y despejando el nuevo peso aparente del lastre en el fondo marino tenemos:

$$Wm_a' = N' + (-W_t - W_a + E + F_L) * l$$

¹⁹ Los cálculos y la experiencia han determinado que la utilización de líneas auxiliares son requeridas para tuberías de hasta 200mm de diámetro exterior.

$$Wm_a' = 118.38 + (-24.61 - 69.29 + 97.67 + 39.16) * 1.5 = 182.76N$$

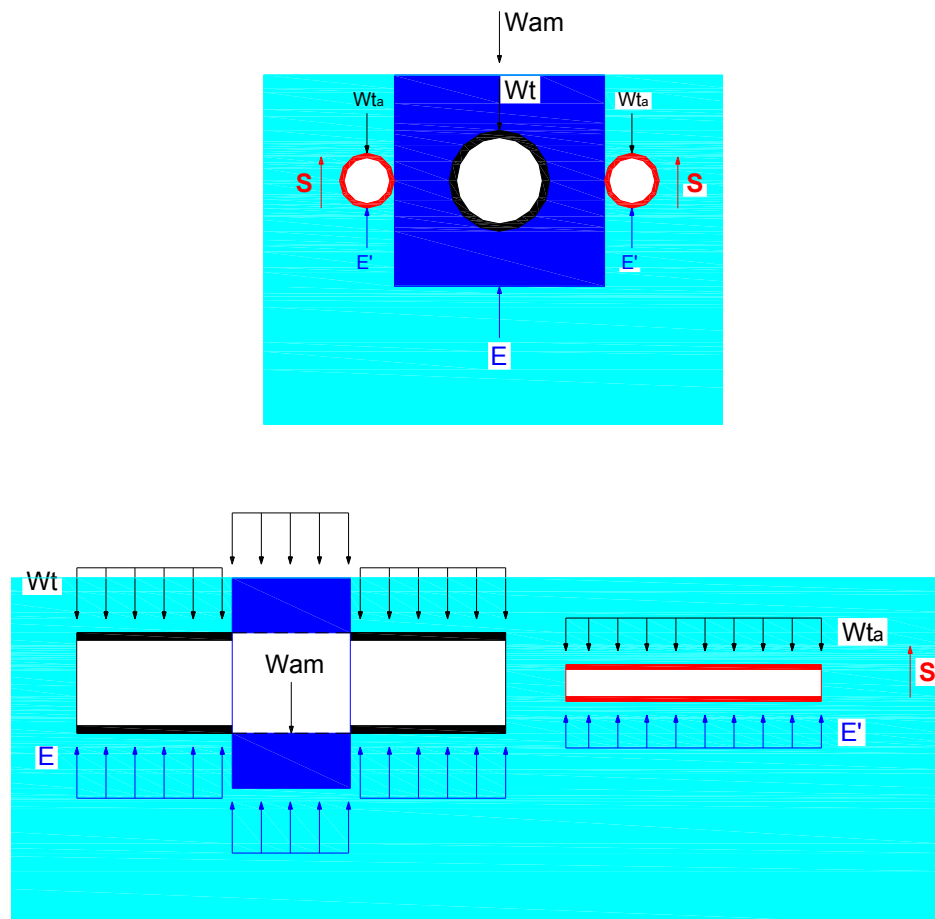
Con este valor, calcularemos el nuevo peso real del lastre de concreto fuera del agua:

$$Wm' = \frac{Wm_a'}{\gamma_c - \gamma_{am}} * \gamma_c = \frac{182.76}{24,000 - 10,250} * 24,000 = 319N$$

Determinación de la fuerza de flotación requerida:

Haciendo el análisis de cuerpo libre a la línea en flotación, incluyendo dentro de ella las líneas auxiliares, podemos calcular el valor mínimo del empuje requerido durante la flotación para el nuevo peso del lastre:

Figura 5.12 Análisis de cuerpo libre de la Línea en Flotación con líneas auxiliares



$$(E + S) * l > Wm_a' + W_t * l \dots \dots \dots (5.22)$$

Donde:

E: Empuje sobre la tubería principal (N/m).

S: Fuerza de flotación de las líneas auxiliares (N/m).

W_{m_a} : Nuevo peso aparente del lastre.

W_t : Peso de la línea principal (N/m).

l: Espaciamiento de línea.

Reemplazando y despejando S de la ecuación 5.22 tenemos:

$$S > \frac{W_{m_a} + W_t * l}{l} - E = \frac{182.76 + 24.61 * 1.5}{1.5} - 97.67 = 48.78 N \dots (*)$$

Determinación de la cantidad y dimensiones de las líneas auxiliares:

La fuerza de flotación proporcionada por las líneas auxiliares es el empuje de dichas líneas menos el peso de las mismas. Esta relación se puede expresar de la siguiente manera:

$$S = n * (E' - W_{taux}) \dots \dots \dots (5.23)$$

Donde: n: Número de líneas auxiliares.

Consideraremos la utilización de dos líneas auxiliares de Tubería de HDPE Dext. 90mm PN-10 SDR 13.6. De esta información podemos calcular el peso y el empuje para cada una de ellas:

$$W_{taux} = \frac{\pi * (d_{ext}^2 - d_{int}^2)}{4} * \gamma_t = \frac{\pi * (0.09^2 - 0.077^2)}{4} * 9,600 = 16.41 N$$

$$E' = \frac{\pi * d_{ext}^2}{4} * \gamma_{am} = \frac{\pi * 0.09^2}{4} * 10,250 = 65.38 N$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 5.23, tenemos:

$$S = 2 * (65.38 - 16.41) = 97.94 N$$

El resultado obtenido cumple la condición indicada líneas arriba (), donde S debe ser mayor a 48.78N. Por lo tanto el nuevo valor para el peso del Lastre de Concreto será de 319N (32.6 Kgf).*

Observación:

Una vez colocada la tubería en flotación sobre el trazado final, se procede a retirarlas cuidadosamente desde la playa hasta el punto opuesto final de la línea para su hundimiento y colocación en el fondo marino.

5.4.6 Predimensionamiento del lastre de concreto:

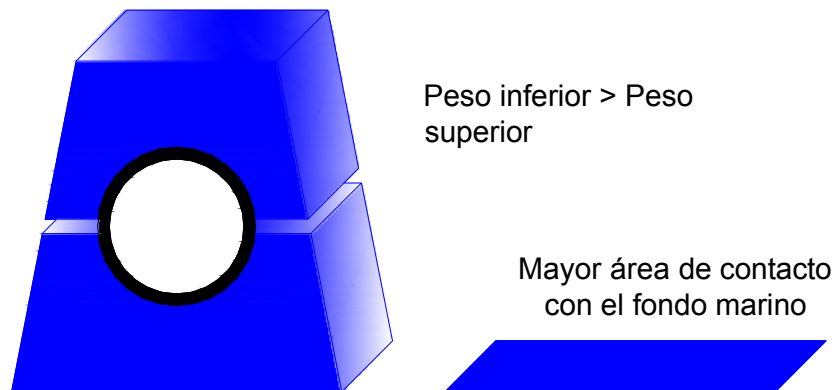
Existen diversos criterios para el dimensionamiento de los lastres de concreto, entre ellos podemos mencionar:

1. Los lastres deben ser fabricados de dos secciones, una superior y otra inferior, con la finalidad de facilitar el montaje de los lastres de concreto a la línea de tuberías y mejorar la sujeción de los lastres a la tubería.
2. El peso de la parte inferior debe ser mayor que el peso de la parte superior (una relación aceptable es de 3 a 2), esto para evitar el volteo del lastre debido la marea y oleaje.

Es muy común en nuestro país usar lastres de secciones trapezoidales los cuales tienen las siguientes ventajas:

1. Tiene un coeficiente de fricción adecuado con el fondo marino (0.5 aprox.) y posee un área mayor de fricción en la base comparado con un lastre rectangular del mismo peso.
2. Facilita la distribución de los peso entre las capas que la conforman (mayor peso de la superior, menor la inferior) debido a su geometría.

Figura 5.13: Lastre de sección Trapezoidal

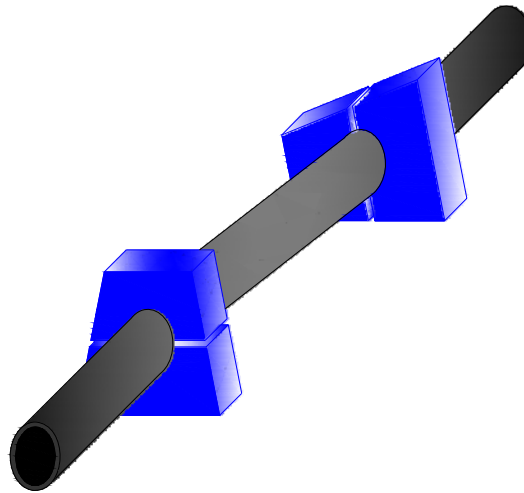


Sin embargo estos tipos de lastres presentan una desventaja grande para tuberías de diámetros menores a 200mm (menores a 200 Kgf aproximadamente) ya que la diferencia de pesos entre la parte superior e inferior es mínima, permitiendo la rotación del lastre sobre el eje de la tubería. Cuando esta rotación se produce en algunos lastres, hace que

la línea presente pendientes no deseadas (debido a su geometría trapezoidal) que disminuye la eficiencia de la línea.

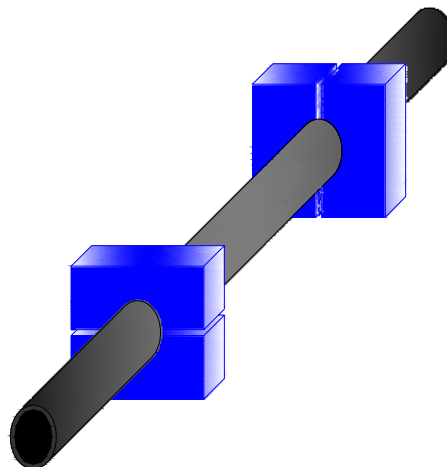
Por otra parte fabricar lastres de forma trapezoidal se complica mucho para dimensiones muy pequeñas, haciendo este modelo inviable constructivamente hablando.

Figura 5.14: Lastre de sección Trapezoidal volteada durante el lanzamiento



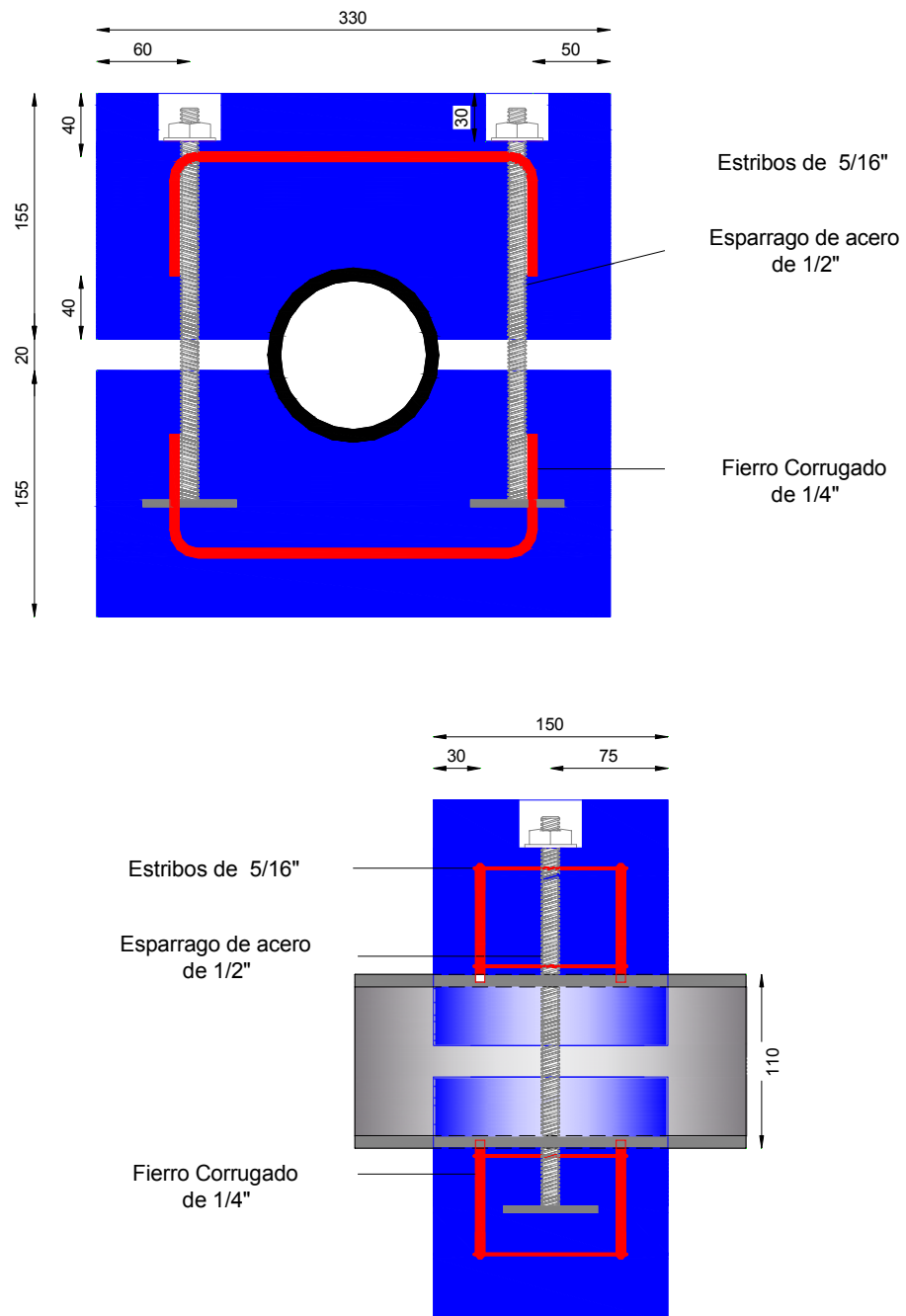
Para tuberías de diámetros menores a 200mm es preferible utilizar lastres rectangulares. Estos por su facilidad de fabricación son ideales para pequeñas dimensiones y si producto del manipuleo durante el lanzamiento y el hundimiento de la línea algunos llegan a voltearse, esto no generaría ninguna pendiente no deseada en la línea debido a la geometría regular de los lastres.

Figura 5.15: Lastre de sección Rectangular volteada durante el lanzamiento



De las consideraciones antes mencionadas llegamos a la conclusión que para nuestro diseño, la sección del lastre debe ser cuadrada y de un peso 319 N (32.6 Kgf). Las dimensiones del mismo la podemos apreciar en la figura siguiente:

Figura 5.16: Principales características del lastre de concreto



Existen algunas consideraciones adicionales que son importantes tener en cuenta:

2. Dependiendo de la dimensión del lastre de concreto, podría analizarse la utilización o no de acero de refuerzo. Normalmente para lastres muy pequeños no es necesaria la utilización de acero de refuerzo, pero suele utilizarse como elemento que favorece la cohesión del concreto.
3. Con la finalidad de unir la parte superior e inferior del lastre de concreto se utilizaran espárragos de acero que pueden ir desde $\frac{1}{2}$ "-1". La sección y la cantidad de espárragos dependerán de los requerimientos de esfuerzos que tengamos. Normalmente el esfuerzo máximo requerido se produce durante las maniobras de lanzamiento y hundimiento de los lastres, debiendo ser su valor cuatro veces el peso del lastre.
4. Se debe dejar un espacio entre las dos partes de lastre para lograr un correcto ajuste al momento de realizar el montaje de la línea. Este espacio debe ser de por lo menos 20 mm.
5. El lastre de concreto debe ser fabricado utilizando un Cemento Portland Tipo V (resistente a los sulfatos) y con una resistencia a la compresión de 240 Kg/m^2 como mínimo
6. Con la finalidad de evitar el desplazamiento de los lastres a lo largo de la tubería durante las maniobras de lanzamiento y hundimiento de la línea se debe colocar cordones de extrusión sobre la tubería antes y después del lastre de concreto, en una longitud no menor a $\frac{1}{3}$ de la longitud total de la circunferencia externa de la tubería.
7. Es recomendable la utilización de laminas de neoprene de $\frac{1}{8}$ " alrededor de la tubería en la interfase tubería-lastre de concreto, para evitar cualquier tipo de ralladura o agrietamiento de la tubería durante el montaje de los muertos.

6. CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

1. Las tuberías de polietileno de alta densidad son la mejor opción técnica para ser usadas en aplicaciones de emisores submarinos, debido a sus excelentes características mecánicas: flexibilidad, resistencia al impacto y a la tensión, que le permiten resistir los enormes esfuerzos producidos durante las maniobras de lanzamiento y hundimiento de la línea.

Por otra parte su composición química que lo hace resistente a la gran mayoría de agentes químicos y la presencia de Negro de humo dentro de composición, garantizan una larga vida útil de estas tuberías en condiciones ambientales muy exigentes como son las marinas, donde la línea esta afectada por el intemperismo y el agua de mar.

6.2 CONCLUSIONES ESPECIFICAS

1. Para emisores submarinos donde el movimiento del fluido se produce por una diferencia de cotas (flujo por gravedad) y no por un sistema de bombeo (es la gran mayoría de casos en nuestro país), es posible utilizar cualquier "clase" de tubería dado que la presión mínima requerida para la tubería es casi siempre menor a 3 bares.
2. El espesor de la pared requerida de la tubería no se rige necesariamente por la presión interna que esta va a soportar producto del transporte del fluido, sino por el manipuleo que debe soportar durante el lanzamiento y hundimiento de la línea y la acción de la marea, oleaje y cambios de temperatura durante su funcionamiento, es decir por la Relación de Flexión Permisible.
3. Se escoge la utilización de una tubería de HDPE Dext. 110mm de una presión de 10 bares en lugar de una de 8 bares, debido a que esta se puede fabricar en rollos de hasta 100 metros, disminuyendo con ello la cantidad de uniones en obra, facilitando y abaratando la instalación de la línea.
4. El esfuerzo longitudinal a largo plazo es el 18.6% del mismo esfuerzo a corto plazo para las tuberías de polietileno de alta densidad, debido a que el módulo de elasticidad del material disminuye en el tiempo, en el PE-80 de 800 MPa a 150 MPa y en el PE100 de 1050 MPa a 200 MPa.
5. El radio de curvatura optimo en condiciones con cargas combinadas, por ejemplo, cargas por presión, por temperaturas, oleaje, etc., se recomienda un radio de curvatura óptimo de 60 veces el diámetro exterior de la tubería; logrando con ello un factor de seguridad contra la ruptura de 2 durante su funcionamiento.
6. La fuerza de empuje que el agua ejerce sobre la tubería es la fuerza principal que debe tomarse en cuenta para los análisis de flotación y estabilidad de la línea, sin embargo la fuerza de sustentación debido a la corriente de mar tiene un efecto muy importante en la estabilidad de la línea durante su funcionamiento.
7. Para tuberías de diámetros menores a 250mm es preferible utilizar lastres rectangulares debido a su facilidad de fabricación y que a no generan

ninguna pendiente negativa en la línea de producirse un volteo durante las maniobras de lanzamiento y hundimiento.

8. Para una tubería de 110mm de diámetro exterior, siempre es requerida elementos de flotación adicionales, siendo la mejor opción la utilización de líneas auxiliares. El número de las líneas auxiliares va a depender de los cálculos correspondientes y de la logística que se posee. Dichas líneas deben ser retiradas durante el proceso de hundimiento de la línea.

7. RECOMENDACIONES:

1. Debido a que una condición crítica permisible para el buen funcionamiento de la línea es no sobrepasar el radio de curvatura mínimo permitido por la Relación de Flexión Permisible, es recomendable que este valor sea conocido por los operarios de los equipos de maquinaria pesada durante el proceso de arrastre de la línea al mar durante el lanzamiento y de los buzos durante las maniobras de hundimiento.
2. El espárrago que sirve para unir las dos capas de concreto del lastre debe ser resistente a la oxidación, pudiendo escogerse entre los más comerciales: acero zincado, acero galvanizado, acero inoxidable 304 y acero inoxidable 316. Es el último el que garantiza una mayor durabilidad, sin embargo debido a su elevado costo es muy poco utilizado para este tipo de proyectos.
3. Para evitar que la tubería sufra daños producto del ajuste de los espárragos durante el montaje de la línea, se recomienda colocar una lámina de neoprene de 1/8" – 1/4" (esto dependerá del diámetro de la tubería).
4. Es recomendable utilizar líneas auxiliares en lugar de bolsas o cilindros para compensar el sobre peso de los lastres debido a que estas distribuyen la fuerza de sustentación a lo largo de toda la línea, evitando así formaciones de curvaturas peligrosas durante las maniobras de lanzamiento.

VIII BIBLIOGRAFÍA:

- Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales – INDECOPI, 2000, Norma Técnica Peruana NTP-ISO 4427:2000 “Tubos de Polietileno (PE) para el abastecimiento de agua”, 29 páginas.
- Empresa Duratec S.A., 2001, Catalogo Técnico de Tuberías y Fittings de HDPE, 91 páginas.
- Tom A. Karlsen (Interconsult ASA), Pipelife Norge AS, 2003, Manual Técnico para instalaciones submarinas para tuberías de polietileno, 84 páginas.
- TEHMCO S.A., Productos PECC, 2005, 68 páginas.
- PHYSICS for Students of Science and Engeneering Part 1, Robert resnick – David Haliday, Toppan Printing Company, Ltd., 1960, 554 páginas.
- Lan Larsen: Marine Waste Water Discharges 2002, Design of marine PE pipes for transient and long-term under-pressure.

IX. ANEXOS

TABLA A.1 PRINCIPALES PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HDPE (T=20C)

Propiedad	Unidad	Valor PE-80	Valor PE-100
Densidad	Kg/m ³	950.00	960.00
Tensión de régimen 50 años $\sigma_d,50$	MPa	5.0 / 6.4	8.0 / 6.3 *
Tensión de régimen tiempo cero, $\sigma_d,0$	MPa	8.0 / 10.4	9.4 / 12.0 *
Modulo de elasticidad tiempo cero, E0	MPa	800.00	1050.00
Modulo de elasticidad 50 años, E50	MPa	150.00	200.00
Índice de Poisson (ν)	-	0.4-0.5	0.4-0.5

* Los coeficientes de seguridad son 1.6 y 1.25 respectivamente.

TABLA A.2 RESISTENCIA DEL HDPE A LOS AGENTES QUÍMICOS

Los resultados que facilitamos a continuación se obtuvieron después de 55 días, en probetas de 50 x 25 x 1 mm.

Signos convencionales

X	Resistente	Hinchamiento < 3% o pérdida de peso < 0.5% Alargamiento de desgarre sin alteración apreciable
/	Resistente bajo determinadas condiciones	Hinchamiento 3-8% o pérdida de peso 0.55% y/o disminución del alargamiento de desgarre < 50%
-	No resistente	Hinchamiento > 8% o pérdida de peso > 5% y/o disminución del alargamiento de desgarre
D	Decoloración	

Medio	20°C	60°C	Medio	20°C	60°C
Aceite de coco	X	/	Aceites minerales	X	X
Aceite de linaza	X	X	Aceite vegetales y animales	X	X
Aceite de parafina	X	X	Acetaldehído, gaseoso	X	/
Aceite de semillas de maíz	X	/	Acetato de Amilo	X	X
Aceite de Silicona	X	X	Acetato de butilo	X	/
Aceite diesel	X	/	Acetato de etilo	/	-
Aceite para husos	X	/	Acetato de plomo	X	X
Aceite para transformadores	X	/	Acetona	X	X
Aceite etéreos	X	/	Ácido acético (10%)	X	X

Medio	20°C	60°C	Medio	20°C	60°C
Ácido acético (100%) glacial	X	/D	Agua de mar	X	X
Ácido adipínico	X	X	Agua Oxigenada (30%)	X	X
Ácido benzoico	X	X	Agua oxigenada (100%)	X	/
Ácido benzilsulfónico	X	X	Agua regia	-	-
Ácido bórico	X	X	Alcanfor	X	/
Ácido bromhídrico (50%)	X	X	Alcohol Arílico	X	X
Ácido butírico	X	/	Alcohol bencílico	X	X
Ácido carbónico	X	X	Alcohol etílico	X	X
Ácido cianhídrico	X	X	Alcohol furfurílico	X	XD
Ácido cítrico	X	X	Almidón	X	X
Ácido clorhídrico (en cualquier concentración)	X	X	Alumbre	X	X
Ácido clorhídrico gaseoso, húmedo y seco	X	X	Amoníaco, gaseoso (100%)	X	X
Ácido cloroacético (nomo)	X	X	Amoníaco, líquido (100%)	X	X
Ácido clorosulfónico	-	-	Anhídrido acético	X	/D
Ácido crómico (80%)	X	-D	Anhídrido sulfúrico	-	-
Ácido dicloroacético (50%)	X	X	Anhídrido sulfuroso, húmedo	X	X
Ácido dicloroacético (100%)	X	/D	Anhídrido sulfuroso, seco	X	X
Ácido esteárico	X	/	Anilina, pura	X	X
Ácido fluorhídrico (40%)	X	/	Anisol	/	-
Ácido fluorhídrico (70%)	X	/	Azufre	X	X
Ácido fluosilícico acuoso (hasta el 32%)	X	X	Benceno	/	/
Ácido fórmico	X		Benzoato sódico	X	X
Ácido fosfórico (25%)	X	X	Bicromato potásico (40%)	X	X
Ácido fosfórico (50%)	X	X	Bisulfito sódico, diluido con agua	X	X
Ácido fosfórico (95%)	X	XD	Borato potásico, acuoso al 1%	X	X
Ácido ftálico (50%)	X	X	Borax, en cualquier concentración	X	X
Ácido glicólico (50%)	X	X	Bromato potásico acuoso (hasta el 10%)	X	X
Ácido glicólico (70%)	X	X	Bromo	-	-
Ácido láctico	X	X	Bromuro potásico	X	X
Ácido maleico	X	X	Butanol	X	X
Ácido málico	X	X	Butanotriol	X	X
Ácido monocloraacético	X	X	Butilglicol	X	X
Ácido nítrico (25%)	X	X	Butoxilo	X	/
Ácido nítrico (50%)	/	-	Carbonato sódico	X	X
Ácido oleico (conc.)	X	/	Cera de abejas	X	/
Ácido oxálico (50%)	X	X	Cerveza	X	X
Ácido perclórico (20%)	X	X	Cetonas	X	X
Ácido perclórico (50%)	X	/	Cianuro potásico	X	X
Ácido perclórico (70%)	X	-D	Ciclohexano	X	X
Ácido propiónico (50%)	X	X	Ciclohexanol	X	X
Ácido propiónico (100%)	X	/	Ciclohexanona	X	/
Ácido silícico	X	X	Clorhidrina de glicerina	X	X
Ácido succínico (50%)	X	X	Clorito sódico (50%)	X	/
Ácido sulfhídrico	X	X	Clorobenceno	/	-
Ácido sulfúrico (10%)	X	X	Cloroetanol	X	XD
Ácido sulfúrico (50%)	X	X	Cloroformo	/	-
Ácido sulfúrico (80%)	X	X	Cloro gaseoso, húmedo	/	-
Ácido Sulfúrico (98%)	X	-	Cloro gaseoso, seco	/	-
Ácido sulfuroso	X	X	Cloro, líquido	-	-
Ácido tánico (10%)	X	X	Cloruro amónico	X	X
Ácido tartárico	X	X	Cloruro de aluminio, anhidrico	X	X
Ácido tricloroacético (50%)	X	X	Cloruro de bario	X	X
Ácido tricloroacético (100%)	X	/	Cloruro de calcio	X	X
Ácido aromáticos	X	X	Cloruro de zinc	X	X
Ácido grasos (> C6)	X	/	Cloruro de etileno (sublimado)	/	/
Acritnitrilo	X	X	Cloruro de metileno	/	X
Agua de cloro (desinfección de tuberías)		X	Cloruro de sulfurilo	-	

Medio	20°C	60°C	Medio	20°C	60°C
Cloruro de tionilo	-	-	Hidróxido de bario	X	X
Cloruro férrico	X	X	Hidróxido potásico (en solución al 30%)	X	X
Cloruro magnésico	X	X	Hidróxido sódico (en solución al 30%)	X	X
Cloruro potásico	X	X	Hipoclorito de calcio	X	X
Cloruro sódico	X	X	Hipoclorito sódico (12% de cloro activo)	/	-
Creosota	X	XD	Isooctano	X	/
Cresol	X	XD	Isopropanol	X	X
Cromato potásico acuoso (40%)	X		Jarabe simple	X	X
Dacahidronaftalina	X	/	Jugos de frutas	X	X
Detergentes sintéticos	X	X	Lejía para blanquear el cloro (12% de cloro activo)	/	-
Dextrina, acuosa (saturada al 18%)	X	X	Levadura, en agua	X	X
Dibutileter	X	-	Melasa	X	X
Diclorobenceno	/	-	Mentol	X	/
Dicloroetano	/	/	Mercurio	X	X
Dicloroetileno	-	-	Mermelada	X	X
Dietileter	X	/	Metanol	X	X
Disobutilcetona	X	/	Metibutanol	X	/
Dimetilformamida (100%)	X	X	Metiletilcetona	X	/
Dioxano	X	X	Metilglicol	X	X
Emulsionantes	X	X	Morfolina	X	X
Esencia de trementina	X	/	Nafta	X	/
Espermaceti	X	/	Naftalina	X	/
Esteres alifáticos	X	X	Nitrato amónico	X	X
Ester etílico del ácido monocloroacético	X	X	Nitrato de plata	X	X
Ester metílico del ácido dicloroacético	X	X	Nitrato potásico	X	X
Ester metílico del ácido monocloroacético	X	X	Nitrato sódico	X	X
Éter	X	/	Nitrobenceno	X	/
Éter de petróleo	X	/	Nitrotolueno	X	/
Éter isopropílico	X	-	Octilcresol	/	-
Etilendiamina	X	X	Oleum	-	-
Etilglicol	X	X	OXicloruro de fósforo	X	XD
Etilhexanol	X	X	Ozono	/	-
Fenol	X	XD	Ozono en sol, acuosa (prep. para agua potable)	X	
Flúor	-	-	Pentóxido de fósforo	X	X
Fluoruro amónico, acuoso (hasta 20%)	X	X	Permanganato potásico	X	XD
Formaldehído (40%)	X	X	Petróleo	X	/
Formamida	X	X	Piridina	X	/
Fosfato de tributilo	X	X	Poliglicoles	X	X
Fosfatos	X	X	Potasa caústica	X	X
Ftalato de dibutilo	X	/	Propanol	X	X
Gases industriales, conteniendo	X	X	Propilenglicol	X	X
- Ácido carbónico	X	X	Pulpa de fruta	X	X
- Ácido Clorhídrico (cualquier concentración)	X	X	Revelador fotográfico, corriente	X	X
- Ácido fluorhídrico (trazas)	X	X	Sales de cobre	X	X
- Ácido sulfúrico húmedo (cualquier concentración)	X	X	Sales de níquel	X	X
- Óxido de carbono	X	X	Sebo	X	X
- Vapores nitrosos (trazas)	X	X	Seudocumeno	/	/
Gasolina	X	X	Silicato sódico	X	X
Gelatina	X	X	Silicato soluble	X	X
Glicerina	X	X	Soles salinos, saturados	X	X
Glicol (concentrado)	X	X	Soluciones para hilar viscosa	X	X
Glucosa	X	X	Soda caústica	X	X
Grasa de desecador	X	/	Sulfato amónico	X	X
Halothan	/	/	Sulfato de aluminio	X	X
Hidrato de hidracina	X	X	Sulfato magnésico	X	X
Hidrocarburo fluorado (p.e. ®Frigen)	/	-	Sulfatos	X	X
Hidrógeno	X	X	Sulfuro amoniaco	X	X

Medio	20°C	60°C	Medio	20°C	60°C
Sulfuro de carbono	/		Tolueno	/	-
Sulfuro sódico	X	X	Tricloroetileno	/	-
Tetrabromuro de acetileno	/	-	Tricloruro de antimonio	X	X
Tetracloroetano	x	-	Tricloruro de fósforo	X	X
Tetracloruro de carbono	/	-	Trietanolamina Tween 20 y 80 (Atlas Chemicals)	X	X
Tetrahidrofurano	X	-	Urea	X	X
Tetrahidronaftalina	X	/	Vapores de bromo	/	
Tintura de yodo DAB 7	X	/D	Vaselina	X	/
Tiofeno	/	/	Vinagre, a concentración corriente	X	X
Tiosulfato sódico	X	X	p-Xileno	/	-

Tabla A.3: Dimensiones para Tuberías PE-80, Norma ISO 4427 (tensión admisible 63 Kg/cm²)

Factor C:1,25		⁽³⁾ Relación estándar de dimensión (SDR)													
		SRD 41		SDR 33		SDR 21		SDR 17		SDR 13,6		SDR11		SDR9	
DN (mm)	⁽²⁾ DN equiv. (pulg)	⁽¹⁾ Presión Nominal PN													
		3,2 bar		4,0 bar		6.0 bar		8,0 bar		10,0 bar		12,5 bar		16 bar	
		e min. (mm)	Dm interior (mm)	e min. (mm)	Dm interior (mm)	e min. (mm)	Dm interior (mm)	e min. (mm)	Dm interior (mm)	e min. (mm)	Dm interior (mm)	e min. (mm)	Dm interior (mm)	e min. (mm)	Dm interior (mm)
20	1/2									2.3	15.4	2.3	15.4	2.3	15.4
25	1/4									2.3	20.4	2.3	20.4	2.8	19.4
32	1									2.4	27.2	3.0	26.0	3.6	24.8
40	1 1/4							2.4	35.2	3.0	34.0	3.7	32.6	4.5	31.0
50	1 1/2							3.0	44.0	3.7	42.6	4.6	40.8	5.6	38.8
63	2					3.0	57.0	3.8	55.4	4.7	53.6	5.8	51.4	7.1	48.8
75	2 1/2					3.6	67.8	4.5	66.0	5.6	63.8	6.8	61.4	8.4	58.2
90	3					4.3	81.4	5.4	79.2	6.7	76.6	8.2	73.6	10.1	69.8
110	4			3.4	103.2	5.3	99.4	6.6	96.8	8.1	93.8	10.0	90.0	12.3	85.4
160	6			4.9	150.2	7.7	144.6	9.5	141.0	11.8	136.4	14.6	130.8	17.9	124.2
200	8			6.2	187.6	9.6	180.8	11.9	176.2	14.7	170.6	18.2	163.6	22.4	155.2
250	10	6.2	237.6	7.7	234.6	11.9	226.2	14.8	220.4	18.4	213.2	22.7	204.6	27.9	194.2
315	12	7.7	299.6	9.7	295.6	15.0	285.0	18.7	277.6	23.2	268.6	28.6	257.8	35.2	244.6
355	14	8.7	337.6	10.9	333.2	16.9	321.2	21.1	312.8	26.1	302.8	32.2	290.6	39.7	275.6
400	16	9.8	380.4	12.3	375.4	19.1	361.8	23.7	352.6	29.4	341.2	36.3	327.4	44.7	310.6
450	18	11.0	428.0	13.8	422.4	21.5	407.0	26.7	396.6	33.1	383.8	40.9	368.2	50.3	349.4
500	20	12.3	475.4	15.3	469.4	23.9	452.2	29.7	440.6	36.8	426.4	45.4	409.2		
560	22	13.7	532.6	17.2	525.6	26.7	506.6	33.2	493.6	41.2	477.6				
630	24	15.4	599.2	19.3	591.4	30.0	570.0	37.4	555.2	46.3	537.4				
710	28	17.4	675.2	21.8	666.4	33.9	642.2	42.1	625.8	52.2	605.6				
800	32	19.6	760.8	24.5	751.0	38.1	723.8	47.4	705.2	58.8	682.4				
900	36	22.0	856.0	27.6	844.8	42.9	814.2	53.3	793.4						
1000	40	24.5	951.0	30.6	938.8	47.7	904.6	59.3	881.4						
1200	48	29.4	1141.2	36.7	1126.6	57.2	1085.6								
1400	54	34.3	1331.4	42.9	1314.2										
1600	64	39.2	1521.6	49.0	1502.0										

2) La presión nominal PN corresponde a la máxima presión de operación admisible pPMS, en bar, a 20°C

3) Valores en pulgadas utilizados como referencia con la norma ASTM / ANSI B 36.10

4) La relación SDR corresponde al cociente entre el diámetro externo y el espesor de la tubería

Nota: La tabla se basa en la norma ISO 4427 "Table 4 – Polyethylene pipes with a design stress σ_s of 6.3 MPA

Tabla A.4: Dimensiones para Tuberías PE-100, Norma ISO 4427 (tensión admisible 80 Kg/cm²)

Factor C:1,25		⁽³⁾ Relación estándar de dimensión (SDR)											
		SDR 27.6		SDR 21		SDR 17		SDR 13,6		SDR 11		SDR 9	
DN (mm)	⁽²⁾ DN equiv. (pulg)	⁽¹⁾ Presión Nominal PN											
		6.0 bar		8.0 bar		10,0 bar		12.5 bar		16 bar		20 bar	
		e min. (mm)	Dm interior (mm)	e min. (mm)	Dm interior (mm)	e min. (mm)	Dm interior (mm)	e min. (mm)	Dm interior (mm)	e min. (mm)	Dm interior (mm)	e min. (mm)	Dm interior (mm)
20	1/2							2.3	15.4	2.3	15.4	2.3	15.4
25	1/4							2.3	20.4	2.3	20.4	2.8	19.4
32	1							2.4	27.2	3.0	26.0	3.6	24.8
40	1 1/4					2.4	35.2	3.0	34.0	3.7	32.6	4.5	31.0
50	1 1/2					3.0	44.0	3.7	42.6	4.6	40.8	5.6	38.8
63	2			3.0	57.0	3.8	55.4	4.7	53.6	5.8	51.4	7.1	48.8
75	2 1/2			3.6	67.8	4.5	66.0	5.6	63.8	6.8	61.4	8.4	58.2
90	3			4.3	81.4	5.4	79.2	6.7	76.6	8.2	73.6	10.1	69.8
110	4	4.0	102.0	5.3	99.4	6.6	96.8	8.1	93.8	10.0	90.0	12.3	85.4
160	6	5.8	148.4	7.7	144.6	9.5	141.0	11.8	136.4	14.6	130.8	17.9	124.2
200	8	7.3	185.4	9.6	180.8	11.9	176.2	14.7	170.6	18.2	163.6	22.4	155.2
250	10	8.2	233.6	11.9	226.2	14.8	220.4	18.4	213.2	22.7	204.6	27.9	194.2
315	12	11.4	292.2	15.0	285.0	18.7	277.6	23.2	268.6	28.6	257.8	35.2	244.6
355	14	12.9	329.2	16.9	321.2	21.1	312.8	26.1	302.8	32.2	290.6	39.7	275.6
400	16	14.5	371.0	19.1	361.8	23.7	352.6	29.4	341.2	36.3	327.4	44.7	310.6
450	18	16.3	417.4	21.5	407.0	26.7	396.6	33.1	383.8	40.9	368.2	50.3	349.4
500	20	18.1	463.8	23.9	452.2	29.7	440.6	36.8	426.4	45.4	409.2		
560	22	20.3	519.4	26.7	506.6	33.2	493.6	41.2	477.6				
630	24	22.8	584.4	30.0	570.0	37.4	555.2	46.3	537.4				
710	28	25.7	658.6	33.9	642.2	42.1	625.8	52.2	605.6				
800	32	29.0	742.0	38.1	723.8	47.4	705.2	58.8	682.4				
900	36	32.6	834.8	42.9	814.2	53.3	793.4						
1000	40	36.2	927.6	47.7	904.6	59.3	881.4						
1200	48	43.4	1113.2	57.2	1085.6								
1400	54	50.6	1298.8										
1600	64	57.9	1484.2										

5) La presión nominal PN corresponde a la máxima presión de operación admisible pPMS, en bar, a 20°C

6) Valores en pulgadas utilizados como referencia con la norma ASTM / ANSI B 36.10

7) La relación SDR corresponde al cociente entre el diámetro externo y el espesor de la tubería

Nota: La tabla se basa en la norma ISO 4427 "Table 4 – Polyethylene pipes with a design stress σ_s of 8 MPA

XI. FOTOGRAFÍAS

Figura 11.1 Construcción de lastres de sección Trapezoidal



Figura 11.2 Alineamiento de los lastres en la orilla de la playa



Figura 11.3 Termofusión de la Tubería de HPDE



Figura 11.4 Alineamiento de la tubería a los lastres de concreto en la orilla de la playa



Figura 11.5 Monatje de la tubería a los lastres de concreto en la orilla de la playa



Figura 11.6 Prueba de Ultrasonido a las uniones por Termofusión



Figura 11.7 Montaje de la líneas auxiliares de Flotación



Figura 11.8 Acercamiento de la línea al mar utilizando cargador frontal



Figura 11.9 Lanzamiento de la línea



Figura 11.10 Colocación de la línea en el punto de trabajo



Figura 11.11 Retirando las líneas auxiliares de flotación

